

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Měřicí modul pro měřicí a testovací stanici E-bike
Measuring Module for E-bike Measurement and Testing
Station

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Latocha**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika
Téma: **Měřicí modul pro měřicí a testovací stanici E-bike**
Measuring Module for E-bike Measurement and Testing Station

Zásady pro vypracování:

1. Měření třífázového výkonu na pohonných jednotkách.
2. Výpočetní technologie platformy ARM - Freescale Kinetis K.
3. Návrh měřicího modulu pro měřicí a testovací stanici E-Bike.
4. Realizace zařízení pro měřicí a testovací stanici E-Bike.
5. Programování měřicího cyklu a komunikace s nadřazeným systémem.
6. Testování zhotoveného řešení měřicího modulu.
7. Závěr a zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VAN SICKLE, Ted. *Programming microcontrollers in C*. 2nd ed. Eagle Rock, Calif.: LLH Technology Pub., c2003. xvi, 454. ISBN 1-878707-57-4.
- [2] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *K20_50: Kinetis K20 USB 50 MHz MCUs, Datasheet documentation*. [online] c2011-2012. [cit.2012-10-26]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/data_sheet/K20P64M50SF0.pdf?fp=1.
- [3] DRECHSLER, Richard. *Měření elektrické energie*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 410 s.
- [4] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce DPS*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [5] KUBICA, Libor. *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - Technická literatura, 2002. 256 s. ISBN 978-80-7300-022-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Prauzek, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martin Latocha', written over a horizontal dotted line.

Datum odevzdání: 7. 5. 2013

Bc. Martin Latocha

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Michalu Prauzkovi, Ph.D. za konzultace, cenné rady a připomínky spojené s vypracováním této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jaromíru Konečnému za konzultace a vedení projektu, pro který je tato práce řešena.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o realizaci měřicího systému pro projekt Měřicí a Testovací stanice pro elektronická kola E-Bike firmy BikeFun International, řešený v laboratoři vestavěných řídicích systémů Katedry kybernetiky a biomedicínského inženýrství. Práce se zabývá způsobem měření elektrických veličin kola, které zahrnují napájecí napětí a proud řídicí jednotky kola. Rovněž je řešen měřicí systém třífázového bezkartáčového motoru, použitého v elektronickém kole. Navržený systém je realizován jako připojitelný modul pro vývojový systém Tower System firmy Freescale Semiconductors. Pro zpracování změřených signálů a výpočet efektivních hodnot a třífázového činného výkonu motoru kola je použit mikrokontrolér Kinetis K s jádrem ARM Cortex-M4.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měřicí systém, E-Bike, měření proudu, měření napětí, třífázový motor, činný výkon motoru, řídicí systém, vestavěný systém, Tower System.

ABSTRACT

This thesis deals with implementation of measuring system for project Měřicí a Testovací stanice (measuring and testing station) for BikeFun International electric bike E-Bike. Project is being completed in Embedded systems laboratory in Department of cybernetics and biomedical engineering. Thesis deals with measurement methods of electric values of bike, which includes bike supply voltage and current. It also deals with three phase motor used in bike. System is implemented as module for Freescale Semiconductors Tower System development platform. Kinetis K microcontroller with ARM Cortex-M4 core is used to process measured signals and calculate RMS values and three phase active power of bike motor.

KEY WORDS

Measuring system, E-Bike, current measurement, voltage measurement, three phase motor, motor active power, control system, embedded system, Tower System.

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>A-D</i>	analogově digitální
<i>AC</i>	střídavá veličina (alternating current)
<i>Ah</i>	ampérhodina
<i>ARM</i>	architektura jádra procesorů (advanced RISC machine)
<i>BCD</i>	dvojkově reprezentované dekadické číslo (binary coded decimal)
<i>BDM</i>	programovací rozhraní procesorů Freescale (background debug mode)
<i>BLDC</i>	bezkartáčový stejnosměrný motor (brushless direct current)
<i>CAN</i>	průmyslová sběrnice (controlled area network)
<i>CANH</i>	vodič sběrnice CAN s vyšším potenciálem
<i>CANL</i>	vodič sběrnice CAN s nižším potenciálem
<i>CRC</i>	cyklický redundantní součet (cyclic redundancy check)
<i>D-A</i>	digitálně analogový
<i>D-PAK</i>	pouzdro povrchové montáže (TO-252)
<i>DC</i>	stejnosměrná veličina (direct current)
<i>DMA</i>	přímý přístup do paměti (direct memory access)
<i>DSC</i>	digitální signální kontrolér
<i>EEPROM</i>	elektronicky mazatelná paměť (electronically erasable programmable read only memory)
<i>FLASH</i>	paměť
<i>FLL</i>	frekvenční závěs (frequency lock loop)
<i>FPGA</i>	programovatelné hradlové pole (field-programmable gate array)
<i>GND</i>	nulový potenciál napájecího zdroje
<i>i</i>	okamžitý elektrický proud (A)
<i>I</i>	elektrický proud (A)
<i>I²C/SM-BUS</i>	integrované sériové rozhraní
<i>IrDA</i>	infračervené komunikační rozhraní (Infrared Data Association)
<i>JTAG</i>	standard programování FLASH pamětí (Joint Test Action Group)
<i>LCD</i>	displej tekutých krystalů (liquid crystal display)
<i>LED</i>	svítivá dioda (light emitting diode)
<i>LIN</i>	lokální sběrnice síť (local interconnect network)
<i>Li-Ion</i>	lithium-iontový akumulátor
<i>OSBDM</i>	otevřené programovací rozhraní procesorů Freescale (open source BDM)
<i>p</i>	okamžitý výkon (W)
<i>P</i>	výkon (W)
<i>P_{TOT}</i>	celkový výkon součástky (W)
<i>PC</i>	osobní počítač (personal computer)
<i>PCI</i>	sběrnice pro připojení periférií (peripheral component interconnect)
<i>PLL</i>	fázový závěs (phase lock loop)
<i>R</i>	elektrický odpor (Ω)

<i>R_{TH-JA}</i>	tepelný odpor, přechod - vzduch (K/W)
<i>RMS</i>	efektivní hodnota (root mean square)
<i>RJ45</i>	koncovka zapojení UTP kabelů
<i>RS232/485</i>	sériová komunikace a sběrnice
<i>RxD</i>	pin přijímání dat (receive data)
<i>SO8</i>	pouzdro povrchové montáže, 8 pinů (small outline)
<i>SRAM</i>	statická paměť s náhodným přístupem (static random access memory)
<i>SPI</i>	sériové rozhraní (serial peripheral interface)
<i>T</i>	teplota (°C)
<i>TxD</i>	pin odesílání dat (transmit data)
<i>u</i>	okamžité elektrické napětí (V)
<i>U</i>	elektrické napětí (V)
<i>UART</i>	sériové rozhraní (universal asynchronous receiver transmitter)
<i>USB</i>	univerzální sériová sběrnice (universal serial bus)
<i>UTP</i>	nestíněný kroucený pár (unshielded twisted pair)
<i>Wh</i>	watthodina
<i>Wi-Fi</i>	technologie bezdrátového přenosu dat

Obsah

1	Úvod	1
2	Důvody a cíle práce	2
2.1	Popis E-Bike	2
2.2	Bezkartáčové motory	2
2.2.1	Princip BLDC motoru	3
2.3	Popis stanice.....	4
3	Měření výkonu v třífázové soustavě	5
3.1	Efektivní hodnota	5
3.2	Měření výkonu na třífázové soustavě	6
3.3	Analogově digitální převodníky.....	7
4	Výpočetní technologie platformy ARM	8
4.1	Procesorová rodina ARM Cortex-M.....	8
4.2	Mikrokontrolery Freescale Kinetis	9
4.3	Vývojový systém Tower	9
4.3.1	Procesorové moduly	10
4.3.2	Moduly	10
4.3.3	Moduly elevators.....	11
4.4	Řadič přímého přístupu do paměti	12
4.4.1	Popis flexibilního snímání	12
5	Návrh řešení	13
5.1	Požadavky na měření	13

5.2	Návrh měřicího systému	14
5.2.1	Napájení.....	14
5.2.2	Napěťové kanály	17
5.2.3	Proudové kanály	18
5.2.4	Komunikace s nadřazeným systémem.....	20
5.3	Kalibrace	21
6	Realizace.....	22
6.1	Popis řídicí desky TWR-K20D72M.....	22
6.2	Popis mikrokontroleru K20_72.....	23
6.3	Požadavky na modul systému Tower.....	24
6.4	Návrh modulu do systému Tower	25
6.4.1	Konektory.....	25
6.4.2	Deska plošných spojů.....	26
6.5	Oživení modulu.....	27
6.5.1	Postup oživení napájení.....	28
6.5.2	Postup oživení měření napětí.....	28
6.5.3	Postup oživení měření proudu	28
6.6	Sestavení celého modulu.....	29
6.7	Systém pro návrh desky plošných spojů Formica.....	29
7	Firmware.....	30
7.1	Processor Expert	30
7.2	Popis firmware	30
7.3	Zpracování změřených dat	31

7.4	Komunikace	34
7.4.1	Odesílání dat nadřazenému systému	34
7.4.2	Příjem dat od nadřazeného systému	36
7.4.3	Změna komunikační adresy.....	37
8	Fyzická kalibrace modulu	38
8.1	Zapojení pro kalibraci	38
8.2	Postup kalibrace	39
9	Testování.....	40
9.1	Proudový odběr	40
9.2	Napěťové kanály	40
9.3	Proudové kanály.....	41
9.4	Detekce průchodu nulou	41
10	Závěr	43
11	Použitá literatura	44
12	Seznam příloh	48

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem měřicího systému pro projekt Měřicí a Testovací stanice pro elektrická kola firmy BikeFun International. Projekt byl řešen v rámci laboratoře vestavěných řídicích systémů Katedry kybernetiky a biomedicínského inženýrství. Předmětem práce je návrh optimálního systému měření elektrických veličin kola, primárně pak měření a výpočet třífázového činného výkonu bezkartáčového motoru kola.

V práci je nejprve popsáno samotné elektrické kolo, pro které je projekt řešen. Následuje popis a požadavky stanice (kapitola 2). Pro účely měření a výpočtu efektivních hodnot střídavých veličin je uveden princip pro výpočet z digitálních vzorků měřeného signálu. Hlavní měřenou veličinou je pak výkon motoru elektrického kola (kapitola 3).

Pro zpracování měřených výsledků a výpočtu výše zmíněných hodnot je zvolen vhodný prostředek v podobě mikrokontroléru s jádrem ARM firmy Freescale Semiconductors. Kvůli nutnosti rychlého prototypového vývoje je použita vývojová platforma Tower System zmíněné firmy. Tato je popsána v kapitole 4, a to včetně nástroje pro automatické měření vzorků z více kanálů analogově digitálního převodníku pomocí řadiče pro přímý přístup do paměti.

Dle stanovených požadavků je posléze proveden návrh měřicího modulu tak, aby bylo dosaženo co nejoptimálnějších výsledků. To zahrnuje popis měřených signálů a návrh vstupních obvodů pro úpravu měřených signálů. Rovněž je navržena napájecí část celého měřicího systému a komunikace s nadřazeným systémem stanice pro odesílání vypočtených výsledků (kapitola 5).

Práce dále obsahuje návrh desky plošného spoje pro vývojovou platformu Tower System tak, aby bylo možné ji k tomuto systému připojit jako modul a zjednodušit a zrychlit tak vývoj celého zařízení. Následuje popis a postup oživení celého zařízení (kapitola 6).

Naprogramováním firmware pro výpočet měření a komunikaci po průmyslové sběrnici s nadřazeným systémem stanice pro mikrokontroler řady Kinetis K20 s jádrem ARM Cortex-M4+ se zabývá kapitola 7. Tato popisuje programovací prostředek Processor Expert a dále všechny algoritmy pro dosažení výpočtu a odeslání hodnot.

Každý měřicí systém musí být po výrobě kalibrován pro dosažení korektních výsledků měření. Fyzickou kalibrací se zabývá kapitola 8.

Nakonec je celý měřicí systém otestován pro ověření správnosti návrhu měřicí části, tedy vstupních obvodů pro úpravu signálů do měřitelné podoby. Testovány jsou i algoritmy pro dosažení korektních výpočtů z naměřených vzorků. Testování je popsáno v kapitole 9.

2 Důvody a cíle práce

Jak bylo zmíněno v úvodu, cílem této práce bylo navrhnout měřicí část projektu Měřicí a Testovací stanice, který byl řešen v laboratoři Vestavěných řídicích systémů pro holandskou firmu BikeFun International. Tato firma se zabývá produkcí jízdních kol s elektrickou podporou, která jsou vyráběna v České republice. Následuje popis elektrického kola a posléze popis celé měřicí a testovací stanice.

2.1 Popis E-Bike

Firma BikeFun International nabízí několik modelů elektrického kola. Tyto ovšem sdílejí elektrické specifikace, proto byl do laboratoře dodán pro testování model Powerflex D24 Lady, viz následující obrázek. [1]



Obr. 1 – E-Bike Powerflex D24 Lady [1]

E-Bike obsahuje v zadním kole bezkartáčový motor Powerflex PAS system o jmenovitém napětí 24 V a výkonu 250 W. Pro napájení je použita baterie Li-Ion firmy Panasonic o jmenovitém napětí 25,2 V a je dodávána ve čtyřech možných provedeních, a to 9 Ah (227 Wh), 11,25 Ah (284 Wh), 13,5 Ah (340 Wh) a 17,4 Ah (438 Wh). [1]

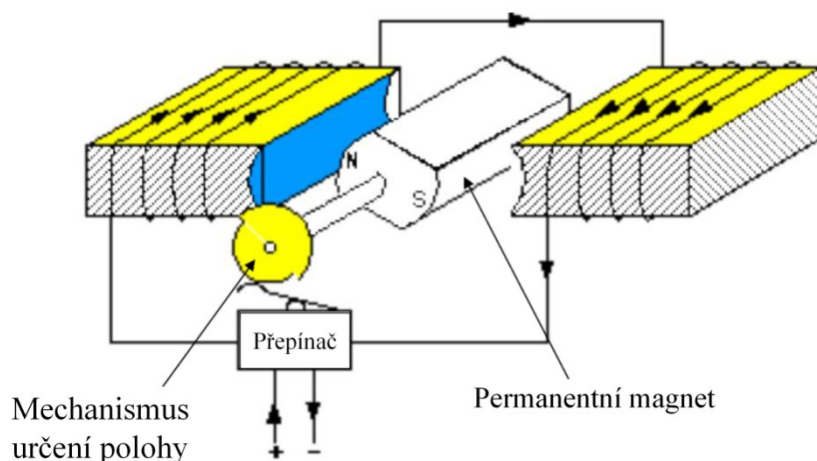
2.2 Bezkartáčové motory

Bezkartáčové motory jsou stejnosměrné elektrické točivé stroje, jinak známé jako DC bezkomutátorové motory, elektronicky komutované motory, AC synchronní motory nebo DC servomotory. Jak již název napovídá, jedná se o motor bez komutátoru. Používá se v mnohých odvětvích, a to např. v automobilovém či leteckém průmyslu, spotřební elektronice, či u automatizačních jednotek. Postupně pak vytlačují klasické střídavé motory, krokové motory a DC motory s komutátorem. Díky absenci komutátoru vyvstává mnoho pozitiv i negativ. Prvním problémem je nutnost elektronické komutace, dalším pak nerovnoměrnost momentu. Následuje výčet pozitiv motoru. [2]

- Lepší momentová charakteristika
- Vyšší účinnost
- Delší životnost (nedochází k opotřebovávání komutátoru)
- Tichý chod oproti jiným stejnosměrným motorům
- Menší rozměry
- Nižší cena oproti kartáčovým motorům [2]

2.2.1 Princip BLDC motoru

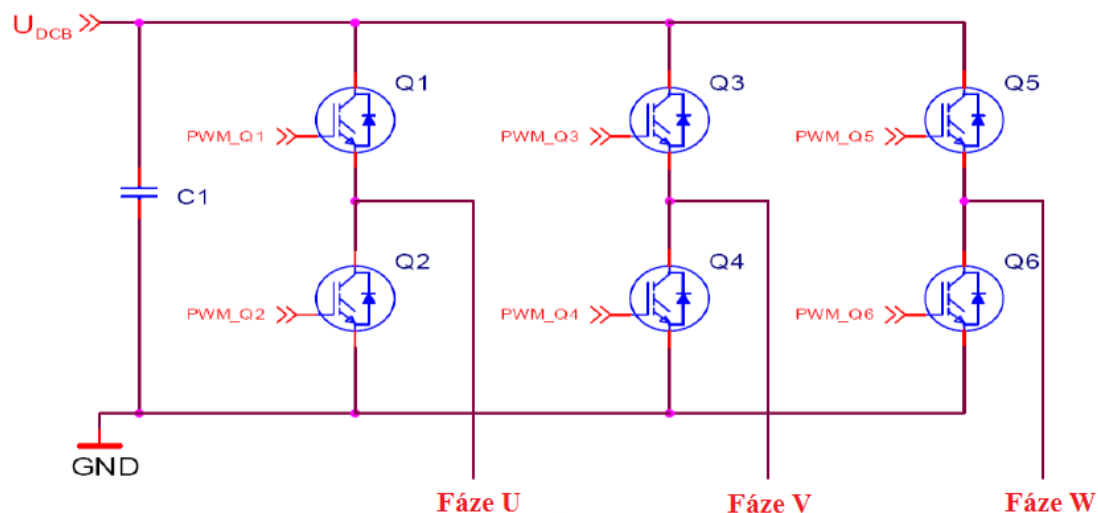
Na statoru motoru je navinuto statorové vinutí. Nejčastěji se používá třífázové vinutí. Jako rotor je použit permanentní magnet pro vytvoření konstantního magnetického pole. Motory se vyrábí jako dvou či více pólové.



Obr. 2 – Základní princip BLDC motoru [3]

Na Obr. 2 se nachází popis bezkartáčového motoru. Zde je pro elektronickou komutaci použito reverzního přepínače, ovládaného pomocí tvarovaného kotouče, připojeného na rotor. Při natočení rotoru do polohy, kdy je potřeba změnit směr protékajícího proudu, tvarovaný kotouč stlačí spínač, který provede změnu směru přepojením přívodních vodičů.

Aby bylo možno dosáhnout správné komutace (resp. přepnutí komutace ve správném okamžiku), je nutno znát polohu rotoru. Toho se nejčastěji dosahuje pomocí Hallových senzorů, inkrementálního snímače, či snímání napětí v jednotlivých větvích (tzv. bezsenzorové řízení). Samotné komutace se nejčastěji dosahuje pomocí třífázového střídače, složeného z šesti tranzistorů zapojených do tří polomůstek. Na Obr. 3 se nachází zapojení napěťového třífázového střídače, kdy se jednotlivé fáze motoru připojují na vývody Fáze U, Fáze V a Fáze W. Ovládání pak zajišťuje řídicí elektronika. V této práci je motor řízen pomocí řídicí jednotky kola, proto zde princip řízení nebude popisován. [3]



Obr. 3 – Napěťový střídač [3]

2.3 Popis stanice

Stanice jako celek má dvě funkce. Slouží jako testovací stanice pro výstupní kontrolu nově vyrobených kol a dále jako měřicí stanice pro testování motorů kola.

Testovací stanice má sloužit k celkovému ověření funkce kompletně složeného elektrického kola ve výrobě, a to jako náhrada testovacích jízd. Vyrobené a zapojené kolo bude otestováno, bude vytisknut záznam o testu, data odeslána do databáze (předpokládaná délka testu přibližně 5 až 8 minut).

Měřicí stanice má sloužit k testování a měření motorů elektrických kol. Měřený motor bude s výpletem a obutím vložen do kola nebo do přípravku trenažeru. Motor bude připojený do měřicí stanice, jež provede měření.

Stanice se bude skládat z následujících částí.

- Řídicí jednotka
- Zdroj pro napájení kola (simulace baterie)
- Motor pro pohon pedálů (simulace šlapání)
- Brzdový mechanismus

Tato práce se zabývá pouze částí, která je obsažena v řídicí jednotce, konkrétně její schopností měřit elektrické veličiny kola. Z tohoto důvodu nebude dále stanice popsána a zbytek práce se bude věnovat pouze měřicím možnostem řídicí jednotky.

3 Měření výkonu v třífázové soustavě

Tato kapitola vysvětluje měření činného výkonu v třífázové soustavě. Popisuje výpočet efektivní hodnoty (True RMS) a výpočet třífázového činného výkonu motoru z diskrétních vzorků. Nakonec popisuje převod analogové veličiny na digitální, čehož se docílí pomocí analogově digitálních převodníků.

3.1 Efektivní hodnota

Efektivní hodnota střídavého proudu je taková hodnota proudu stejnosměrného, která na daném odporu vyvine za jednu periodu stejné množství tepla jako proud střídavý. Pro sinusové průběhy platí vzorec (1), kde I_{max} je amplituda signálu. [4]

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Měření efektivní hodnoty napětí a proudu se provádí pomocí algoritmů operujících ve frekvenční či časové oblasti. Pro první způsob se používá přesné určení amplitudové části frekvenčního spektra, a to např. použitím okének či interpolace ve spektru. Naproti tomu měření efektivní hodnoty v časové oblasti používá odhad periody měřeného signálu. Perioda se měří na základě průchodu signálu určitou úrovní, např. nulou či střední hodnotou. Zde ovšem vyvstává potřeba částečné znalosti měřeného průběhu, a to především znalost počtu průchodů úrovní během jedné periody.

Pro výpočet efektivní hodnoty analogového signálu se používá vztahu (2), kde T je doba měření (perioda signálu) a $x(t)$ je vstupní měřený signál. Pro digitálně zpracovaný signál se používá diskrétní obdoba (3) vztahu (2). Zde je signál vzorkován a uložen do pole vzorků $x(n)$, přičemž N je počet všech vzorků. [5]

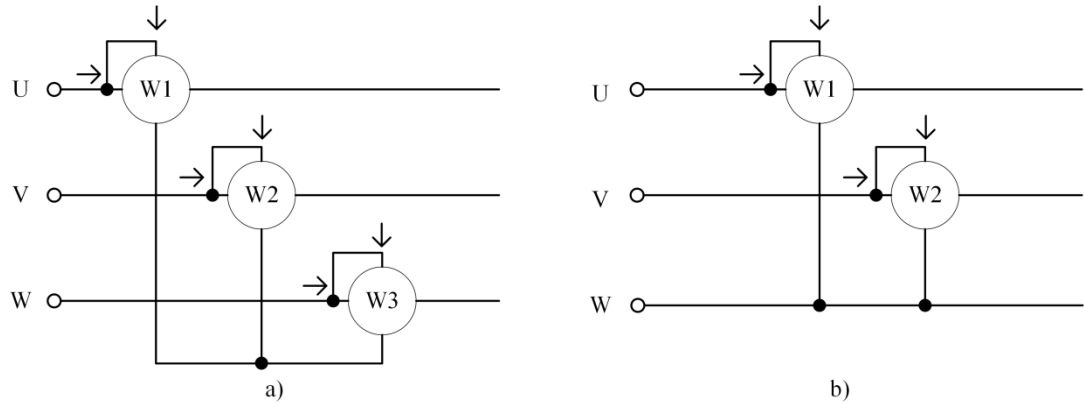
$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2)$$

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)} \quad (3)$$

Odpovídají-li meze integrálu vztahu (2) periodě měřeného signálu, pak vypočtená hodnota je skutečná efektivní hodnota signálu. Totéž platí v případě vzorce (3), tedy leží-li vzorky 0 až N v jedné (či více) celistvé periodě signálu, výsledek vztahu odpovídá skutečné efektivní hodnotě. [5]

3.2 Měření výkonu na třífázové soustavě

Mezi základní měření výkonu v třífázové soustavě (přičemž se počítá s nesouměrnou zátěží) patří měření třemi wattmetry. Dalším je pak zapojení se dvěma wattmetry, tzv. Aronovo zapojení. Obě tyto metody jsou zobrazeny na Obr. 4. Celkový výkon je pak roven součtu výkonů jednotlivých fází, a to i pro Aronovo zapojení. [6]



Obr. 4 – Zapojení se třemi wattmetry (a) a Aronovo zapojení (b) [6]

Pro účely této práce lépe slouží zapojení se třemi wattmetry. Pro digitalizaci je místo wattmetrů použit voltmetr a ampérmetr v každé fázi, které jsou zapojeny stejně jako wattmetry na obrázku výše.

Po digitalizaci jsou vzorky reprezentovány jako okamžité vektory \mathbf{u} a \mathbf{i} (4), kdy je okamžitý činný výkon vypočten jako skalární součin těchto vektorů, tedy součet součinů jednotlivých vzorků korespondujících kanálů (5). [7]

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_U \\ u_V \\ u_W \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$p = \mathbf{u} \cdot \mathbf{i} = u_U i_U + u_V i_V + u_W i_W \quad (5)$$

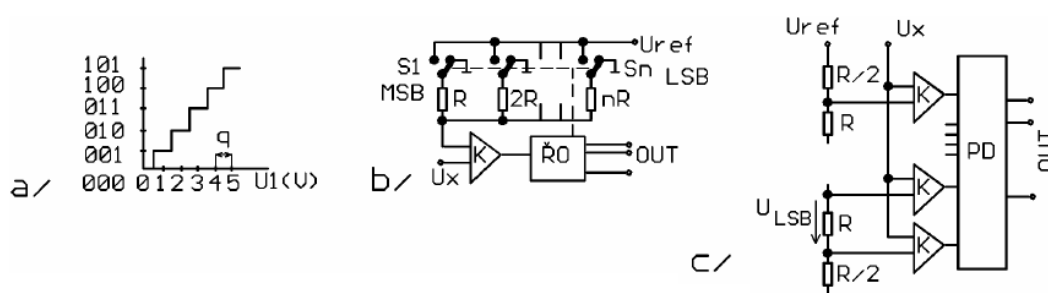
Celkový činný výkon P je pak vypočten jako podíl sumy všech okamžitých výkonů $p(n)$ a jejich počtu N (6). [7]

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N p(n) \quad (6)$$

3.3 Analogově digitální převodníky

Základními kroky k převodu analogové veličiny na číselnou hodnotu jsou vzorkování, kvantování a kódování. Výstupem z A-D převodníku je číselný kód, který je nejčastěji vyjádřen n -bitovým binárním číslem či BCD kódem. Tento nabývá konečného počtu hodnot odpovídajících celému rozsahu vstupních napětí. Ideální převodní charakteristika má pak schodovitý tvar, kde vzdálenost sousedních hodnot se nazývá kvantovací krok (viz Obr. 5a). Chyby A-D převodníků se dělí na statické a dynamické. Statické chyby se dále dělí na chybu zesílení, chybu nuly a chybu linearity. Přesnost převodníku značně ovlivňuje stabilita referenčního zdroje napětí, který musí být teplotně kompenzovaný a dlouhodobě stabilní.

Existuje více typů převodníků. Mezi rychlejší typy patří paralelní (komparační) převodníky (Obr. 5c), převodníky s postupnou aproximací (Obr. 5b), delta-sigma převodníky. Mezi pomalejší a často používané v digitálních multimetrech patří převodníky s dvojitou integrací. [8]



Obr. 5 – Převodní charakteristika (a), b) aproximační převodník (b), paralelní převodník (c) [8]

4 Výpočetní technologie platformy ARM

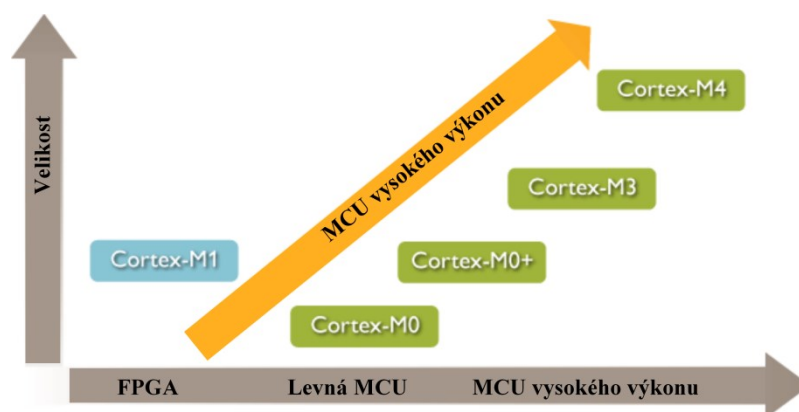
V této kapitole bude popsána výpočetní technologie procesorové platformy ARM, konkrétně pak procesory ARM Cortex-M. Na této rodině procesorů je postavena řada mikrokontrolerů Kinetis firmy Freescale. Dále bude popsán vývojový systém Tower této firmy, na kterém bude měřicí systém realizován.

Firma ARM Holdings patří mezi hlavní světové dodavatele polovodičových řešení. Licencuje duševní vlastnictví více jak 2500 partnerům, kteří takto vytvářejí a produkují vlastní řešení mikrokontrolerů na jejich platformě. Partneři pouze platí firmě ARM Holdings licenční poplatky a malou část z každého vyrobeného čipu. V době psaní této práce se ARM platforma využívala v 95 % chytrých telefonů, 80 % digitálních foťáků a v 35 % všech elektronických zařízeních. [9]

4.1 Procesorová rodina ARM Cortex-M

Procesorová rodina ARM Cortex-M obsahuje velké množství energeticky efektivních procesorů, navržených pro snadné použití a k dosažení požadavků vestavěných aplikací. Mezi tyto patří například více vlastností za nízkou cenu, co největší konektivita a co nejnižší energetický odběr. Používají se především pro nízko příkonové mikrokontrolery pro aplikace chytrých měření, zařízení pro rozhraní s člověkem (tedy herní a ovládací zařízení), automobilové a průmyslové řídicí systémy, spotřební produkty a lékařské přístroje.

Rodina ARM Cortex-M skýtá několik řad procesorů. Jsou to M0 a M0+, které se používají pro nízkonákladové, jednoduché a nejméně výkonné mikrokontrolery. Dále M1, používané v hradlových polích FPGA. Řady M3 a M4 se používají ve vysoko výkonných mikrokontrolerech, a to především pro 16, 32 bitové aplikace, či aplikace s digitálními signálními kontroléry, a to pro výkonnost, běžné použití a efektivní řízení digitálních signálů. Následující obrázek ukazuje graf výkonnosti a velikosti popsaných řad procesorů. [10]



Obr. 6 – Graf procesorů ARM Cortex-M [10]

4.2 Mikrokontrolery Freescale Kinetis

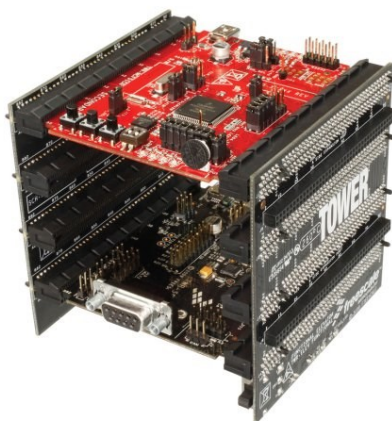
Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, mikrokontrolery řady Kinetis jsou postaveny na jádře ARM Cortex-M. Dělí se na dvě základní série, a to sérii Kinetis L s jádrem ARM Cortex-M0+ a sérii Kinetis K s jádrem ARM Cortex-M4. Tyto obsahují široké portfolio analogových, komunikačních, ovládacích a bezpečnostních prvků. [11]

Série Kinetis K obsahuje více než 200 kompatibilních 32 bitových mikrokontrolerů, postavených na jádře ARM Cortex-M4. Tato série se vyznačuje rychlými 16 bitovými A-D převodníky (i více na jednom čipu), D-A převodníky a zesilovači s programovatelným zesílením. [12]

4.3 Vývojový systém Tower

Vývojová platforma Tower System firmy Freescale Semiconductors je modulární, škálovatelná a flexibilní. Je určena pro rychlý vývoj zařízení pro automobilovou techniku, spotřební elektroniku, zdravotnickou techniku i síťové technologie. Řídicí moduly obsahují 8 bitové S08, 16 bitové S12 i 32 bitové mikrokontrolery ColdFire, Kinetis ARM a architekturu Power, včetně digitálních signálních mikrokontrolerů.

Tento levný systém se dále skládá z modulů, jako je například sériový modul, obsahující komunikační prvky pro USB, Ethernet, RS232/485, CAN a LIN. Dalšími pak jsou moduly pro zpracování analogových veličin, audio signálů, LCD displejů, senzorů neelektrických veličin, bezdrátové komunikace apod. Moduly jsou k sobě připojovány pomocí modulů elevators, popsaných níže. Následující obrázek ukazuje složený systém Tower s procesorovou deskou a modulovou komunikační deskou. Mechanický popis modulů se nachází v kapitole 6.2. [13]

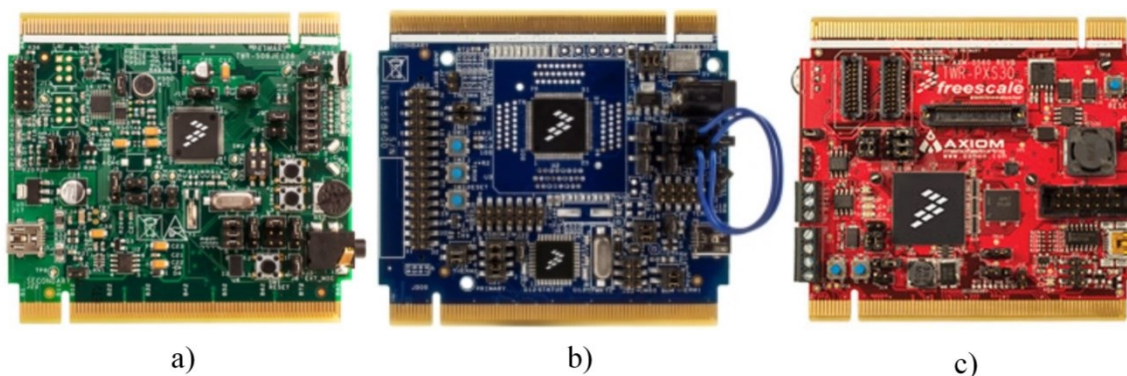


Obr. 7 – Vývojová platforma Tower System [13]

4.3.1 Procesorové moduly

Základem každého systému je modul s procesorem (či mikrokontrolérem). Procesorové moduly jsou jedním ze tří základních prvků Tower systému. Mohou pracovat samostatně za účelem ladění, či jako součást systému Tower. Součástí každého modulu je programovací a ladící rozhraní, připojené přes USB, pro jednoduché programování a testování aplikace. Firma Freescale Semiconductors nabízí široké portfolio procesorových modulů. [14]

- 8 bitové mikrokontroléry
- 16 bitové mikrokontroléry
- ColdFire+ či ColdFire
- Digitální signální kontroléry
- Kinetis ARM
- Architektura Power

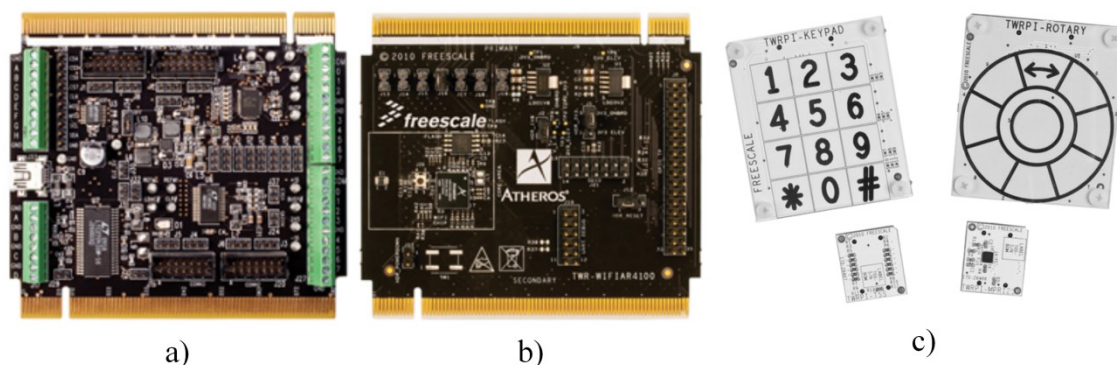


Obr. 8 – 8 bitový (a), DSC (b) a Power (c) procesorový modul [14]

4.3.2 Moduly

Dalším stavebním prvkem systému Tower jsou moduly s různými řešeními komunikací, ovládání motorů, senzory, displeje apod. Tyto jsou rozděleny do tří následujících částí.

První segment obsahuje analogové převodníky, audio kodeky, dokovací modul pro iPhone, průmyslové vstupy a výstupy, LCD displeje, ovladače BLDC motorů, mechatronický systém, paměťové a senzorové moduly, moduly automobilových senzorů, sériové komunikace (USB, Ethernet, CAN, RS232/485) a prototypový modul. Druhý segment se zabývá rádiovou komunikací. Obsahuje rádiové moduly a moduly pro komunikaci po síti Wi-Fi. V posledním segmentu jsou zahrnuty moduly, připojované přímo na procesorové či konektorové moduly. Jedná se o dva typy akcelerometrů, barometr a tlakový senzor, dále balík dotykových komponent, jako jsou klávesnice, rotační plochy a dotykové kapacitní senzory, rovněž senzory pro detekci přiblížení. [13]



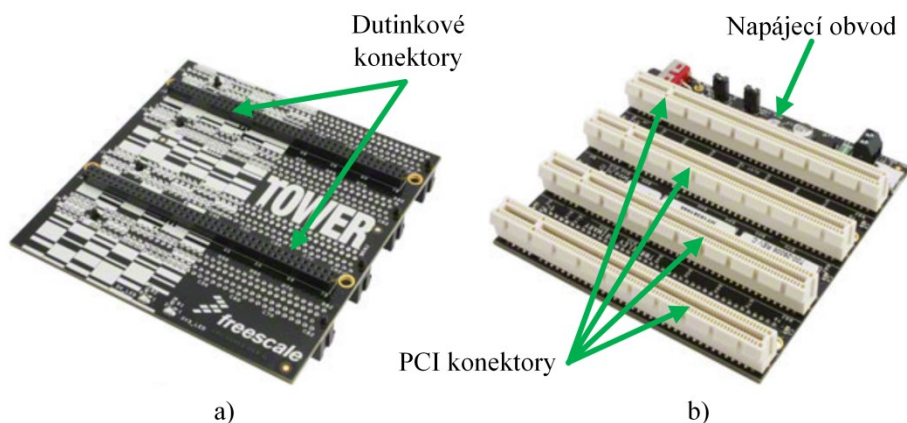
Obr. 9 – Analogový (a) a Wi-Fi (b) modul, dotykové „Plug-in“ moduly (c) [13]

4.3.3 Moduly elevators

Jedná se o základní stavební bloky celého systému Tower. Používají se pro elektrické a mechanické propojení procesorových desek s modulovými deskami. Tyto moduly jsou vždy dodávány dva (primární a sekundární), které se zapojují po obou stranách desek modulů a tvoří tak strukturu věže (Tower), jak je vidět na Obr. 7 výše.

Mechanicky je modul elevator tvořen deskou plošného spoje se čtyřmi paralelně zapojenými PCI konektory (obsahující 164 pinů), do kterých se zapojují moduly, jejichž okraje jsou upraveny jako protistrana PCI konektorů. Pomocí těchto se pak přenášejí signály mezi jednotlivými moduly. Pro snadný přístup k signálům slouží dva 80 pinové dutinkové konektory. K těmto se připojují další modulové desky, jako např. moduly s displejem.

Moduly elevators dále obsahují obvod pro úpravu napájení pro celý systém. Napájecí napětí o velikosti 5 V se připojuje buď pomocí Mini USB konektoru nebo šroubovací svorkovnice. Na Obr. 10 se nachází popis obou elevatorových desek. [15]



Obr. 10 – Popis sekundárního (a) a primárního (b) modulu elevator [15]

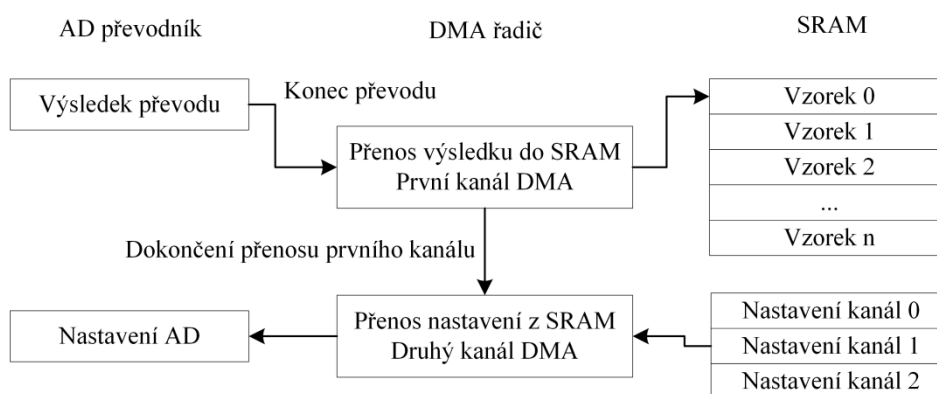
4.4 Řadič přímého přístupu do paměti

Uvedený mikrokontrolér disponuje řadičem přímého přístupu do paměti (dále jen DMA, anglicky Direct Memory Access). Jak název napovídá, jedná se o řízení přenosu dat z periferií do paměti bez použití procesoru. Díky tomu lze např. změřit velké množství vzorků za krátký čas, jejichž zpracování procesorem by nebylo v krátkém okamžiku možné. Změřené vzorky se pak procesorem zpracují až ve větším počtu v době, kdy DMA nabírá další vzorky. Řadič není řízen žádným programem. Jedná se o jednoúčelové zařízení, jehož úkolem je pouze přístup do paměti. K jeho funkci stačí zadat kolik dat má přenést, zdrojovou adresu a počáteční cílovou adresu v paměti. Programově se pouze spustí. [16]

4.4.1 Popis flexibilního snímání

DMA řadič spolu s A-D převodníkem v procesorech Kinetis disponuje funkcí flexibilního snímání (Flexible Scan). Díky tomu je možno automaticky měřit více kanálů bez zásahu procesoru. Měřené vzorky jsou přímo ukládány z jakéhokoliv vstupu A-D převodníku do paměti SRAM.

Pro vytvoření funkce flexibilního snímání je nutno použít dva kanály DMA řadiče pro jeden A-D převodník. Kanál s vyšší prioritou slouží k přenosu dat z výstupu převodníku do paměti SRAM. Druhý kanál s nižší prioritou pak přenáší nové nastavení převodníku z paměti do příslušného registru převodníku. Následující obrázek popisuje přenos dat obou kanálů. [17]



Obr. 11 – Přenos dat flexibilního snímání DMA řadičem [17]

Jak je patrné z Obr. 11, po ukončení převodu je výsledek přenesen prvním kanálem do paměti na adresu *Vzorek 0*. První kanál po přenesení dat vyše požadavek na druhý kanál. Tento pak z jiného místa v paměti přeneše nastavení A-D převodníku pro změření dalšího jeho kanálu, a to přímo do registru převodníku. Tím je okamžitě inicializováno měření. Po jeho ukončení jsou data přenesena prvním kanálem na adresu *Vzorek 1* a druhý kanál nastaví A-D převodník pro změření dalšího kanálu, atd. [17]

5 Návrh řešení

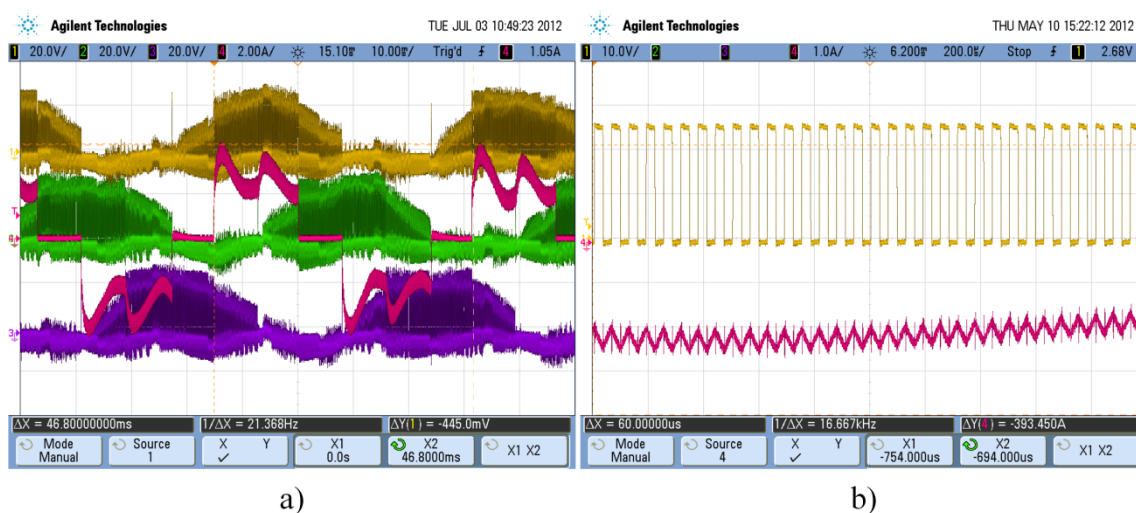
Následující podkapitoly popisují požadavky na měřicí systém stanice a měřené signály. Dále pak obsahují návrh jednotlivých částí měřicího systému, a to popis jednotlivých měřicích kanálů, napájení systému a komunikace s nadřazeným systémem.

5.1 Požadavky na měření

Stanice musí umět změřit jak stejnosměrné, tak střídavé veličiny. Mezi stejnosměrné měření patří napětí a proud stejnosměrného motoru série PDS132190 s planetovou převodovkou, připojeného k šlapátkům kola. Tento má možnost otáčet se na obě strany, což musí být měřením detekovatelné. Je tedy nutno měřit i záporné veličiny. Jmenovité napětí motoru je 24 V a jmenovitý proud 23 A. Udávaný jmenovitý výkon motoru je 420 W. [18]

Další měřenou částí stanice je simulátor baterie. Jedná se o zdroj stejnosměrného napětí o hodnotě $27\text{ V} \pm 3\text{ V}$, dle simulace nabití baterie, přičemž nikdy nepřesahuje 30 V. Proud se špičkově pohybuje mezi 20 A až 30 A. Jak bylo uvedeno v kapitole 2, měřicí stanice musí umět změřit elektrické parametry bezkartáčového motoru kola, řízeného napěťovým střídačem. Je tedy nutno umět změřit efektivní napětí a proudy v jednotlivých fázích a činný třífázový výkon.

Následující obrázek ukazuje tři napěťové fáze a proud první fáze motoru (červený signál) při částečném zatížení kola, přibližně 150 W. Na fotografii osciloskopu měřených signálů motoru lze vidět značné zašumění napěťových průběhů. To je způsobeno řízením úrovně napětí pomocí pulzně šířkové modulace, vyobrazené na následujícím obrázku. Zde je patrná frekvence modulace, a to 16,6 kHz.



Obr. 12 – Měřené signály (a) a detail napětí a proudu jedné fáze (b)

5.2 Návrh měřicího systému

Následující podkapitoly se zabývají návrhem měřicího systému dle výše zmíněných požadavků na měření. Vzhledem k primární funkci měření výkonu na motoru a z toho vycházející podmínkou co nejkratších přírodních silových kabelů k motoru kola, bude měřicí systém řešen jako mobilní modul. Tento bude s řídicí jednotkou stanice komunikovat pomocí průmyslové sběrnice.

Z výše uvedených důvodů budou dodávány dva moduly.

- Modul v rozvaděči pro měření stejnosměrných hodnot
- Mobilní modul pro měření na motoru kola

Modul bude obsahovat šest měřicích kanálů. Tři kanály pro měření napětí vůči virtuální nule, zbývající kanály pak pro měření proudu. Vzhledem k nutnosti číslicového zpracování výsledků a stejného rozsahu obou druhů veličin bude možno tímto systémem měřit i stejnosměrné hodnoty pouze úpravou číslicového zpracování naměřených výsledků.

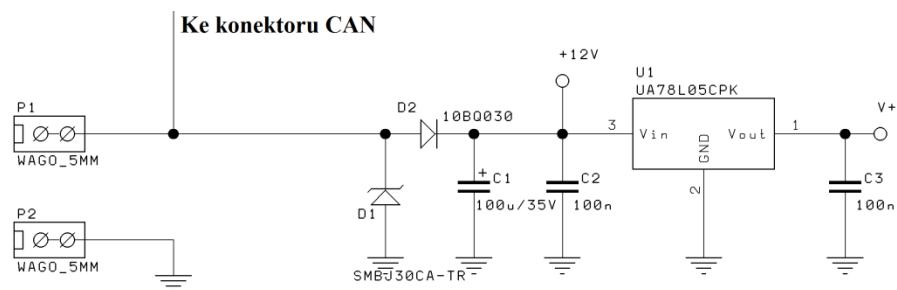
5.2.1 Napájení

Aby byl modul připojitelný k třífázovému motoru tak, aby měřil průběhy napětí na jeho fázích, je nutné fáze spojit přes odpory a vytvořit virtuální zem. Pro předejití problémům s galvanickým oddělením měřených signálů bude oddělen od napájení celý modul, jehož nulový potenciál bude připojen k virtuální nule motoru.

O galvanické oddělení se stará dvojice spínaných izolovaných měničů firmy Murata a firmy TracoPower, snižující napětí z 12 V na 5 V. Oba vykazují účinnost až 80 % a izolaci stejnosměrného napětí až 3 kV pro měnič Murata a 1 kV pro měnič TracoPower po dobu jedné minuty. Jejich další výhodou je absence nutnosti připojovat externí kondenzátory. Tyto jsou ale v zapojení použity pro snížení záskmitů a šumu. [19][20]

Měnič Murata obsahuje duální výstup +5 V a -5 V a je použit pro napájení měřicí části. Měnič TracoPower má pouze kladný výstup +5 V a vykazuje větší proudovou zatížitelnost (až 400 mA) než měnič Murata (200 mA na jednu větev). Předpokládaný špičkový odběr procesorové desky je až 300 mA. Důvodem pro použití měničů různých výrobců je jejich nedostupnost v době pořizování součástek. [19][20]

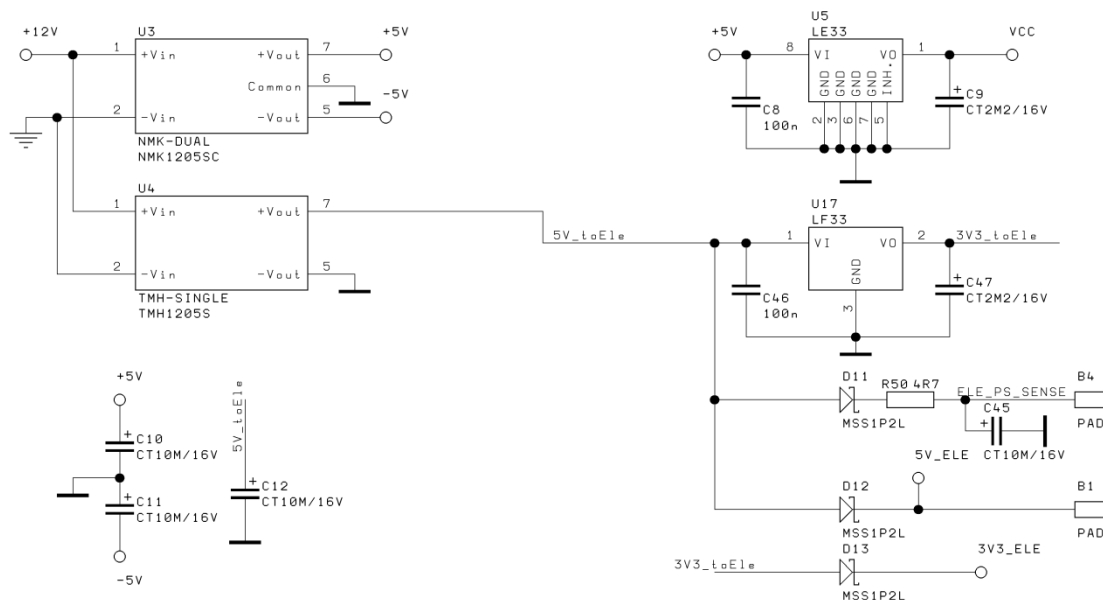
Kompletní napájecí obvod je složen ze dvou částí. První část se nachází na neoddělené straně, kde je připojena sběrnice. Druhá část pak obsahuje výše popsané izolované měniče a další úpravu napětí pro obvody na galvanicky oddělené straně celého modulu.



Obr. 13 – Napájení, vnější část

Na Obr. 13 se nachází schéma zapojení neizolované části modulu. Konektory P1 a P2 slouží k přivedení napájecího stejnosměrného napětí 12 V a slouží spíše v případě ladění modulu. Napájecí napětí je rozvedeno dvěma páry kroucené dvojlinky kabelu UTP, která slouží k připojení sběrnice. Transil D1 slouží ke zkratování napěťových špiček větších než 30 V, které se mohou na napájecích vodičích vyskytnout. Kondenzátor C1 slouží ke kompenzaci podpětí. Dioda D2 pak chrání celý modul před přepólováním napájecího napětí. [21]

Lineární stabilizátor U1 slouží pro vytvoření napětí 5 V pro čip SN65HVD1050D, který slouží k ovládání fyzické vrstvy komunikační sběrnice CAN. Jeho zapojení je popsáno v podkapitole 5.2.4. Vzhledem k jeho nízkému odběru (maximálně 70 mA, tedy výkonová ztráta 100 mW) není třeba stabilizátor chladit. [22]



Obr. 14 – Napájení, vnitřní část

Na Obr. 14 se nachází zapojení výše popsaných měničů a dalších obvodů pro úpravu napájení modulu. Aby nedošlo k poškození nebo zničení procesorové desky vlivem chyby, budou obvody pro úpravu napětíových signálů napájeny napětím 3,3 V. K tomu slouží obvod U5, což je lineární stabilizátor LE33 v pouzdře SO8 s maximálním výstupním proudem 100 mA. Tento obvod obsahuje vstup pro vypnutí celého stabilizátoru (pin5 – Inhibit). V zapojení ale není použit a stabilizátor je trvale zapnutý. [23]

Další lineární stabilizátor U17 snižuje napětí opět na 3,3 V, nicméně jeho vstupem je napětí z měniče TracoPower, a je tedy použit pro napájení procesorové desky modulu. Tento stabilizátor LF33 v pouzdře D-PAK vykazuje vyšší proudovou zatížitelnost až 1 A. [24]

Vzhledem k možné zatížitelnosti (až 300 mA) následuje výpočet pro chladicí plochu pouzdra. V katalogovém listu obvodu je uveden tepelný odpor mezi přechodem a okolním prostředím pro pouzdro D-PAK, jehož hodnota je 100 K/W. Pomocí rovnice (7) je vypočten ztrátový výkon na stabilizátoru. Rovnice (8), vycházející z analogie s elektrickými veličinami, řeší teplotu přechodu, pokud je použita chladicí plocha upravena pouze pro připájení součástky. [24][25]

$$P_{TOT} = (U_{in} - U_{out}) \cdot I_{out} = (5 - 3,3) \cdot 0,3 = 0,51W \quad (7)$$

$$\Delta T_{J-A} = P_{TOT} \cdot R_{TH-JA} \quad (8)$$

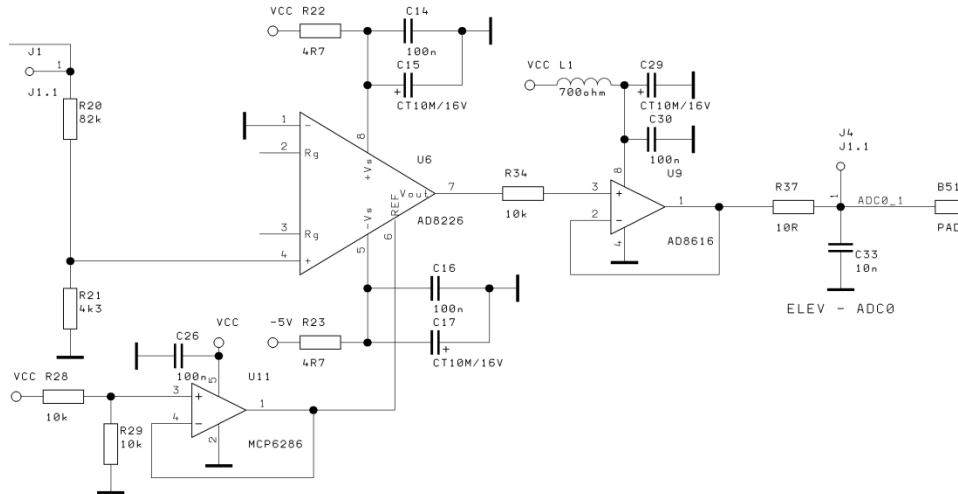
$$T_J = (P_{TOT} \cdot R_{TH-JA}) + T_A = (0,51 \cdot 100) + 35 = 86^\circ\text{C} \quad (9)$$

Z výsledku rovnice (9) je zřejmé, že i při zatížení 300 mA (maximální zatížení procesorové desky, viz výše) teplota přechodu nepřekračuje povolenou hodnotu 125 °C i v případě, kdy není použit chladič či zvětšená plocha na desce plošného spoje pro chlazení. Takovýto trvalý odběr procesorové desky se nicméně nepředpokládá. Může nastat pouze chvilkově a celý obvod je proto předimenzován. [24]

Z výše uvedených vztahů a popisu zapojení vyplývá, že chlazení stabilizátoru není nutné řešit. Toto je zapříčiněno malým ztrátovým výkonem stabilizátoru díky sníženému vstupnímu napětí z měniče TracoPower (+5 V).

5.2.2 Napět'ové kanály

Pro zpracování signálu integrovaným A-D převodníkem tak, aby nedošlo k poškození mikrokontroleru, napájeného unipolárně, je nutno měřený signál upravit do měřitelné formy. Vzhledem k nutnosti měření střídavého signálu značného rozsahu není možno přepínat citlivost měření. Následuje schéma zapojení jednoho kanálu pro úpravu průběhu vstupního napětí na měřitelný signál.



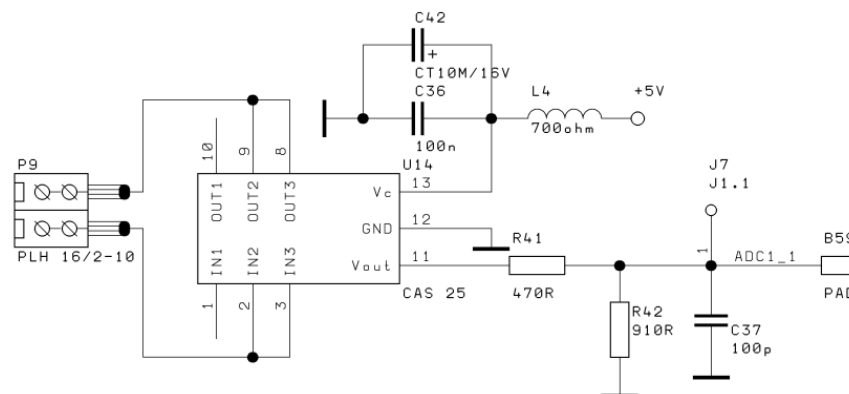
Obr. 15 – Napět'ový kanál

Odpory R20 a R21 mají v tomto obvodu dvě funkce. Jako napět'ový dělič snižují amplitudu měřeného signálu. Dále jako celkový odpor, zapojený z fázového vodiče motoru proti zemi, tvoří spolu s dalšími dvěma kanály virtuální zem. Následuje jejich výpočet. Maximální povolená amplituda je polovinou napájecího napětí mikrokontroleru (tedy 1,65 V), a to z důvodu nutnosti měření záporných veličin. Odpory jsou voleny tak, aby vstupní rozsah byl vyšší než zadaných 30 V. Jako vstupní napětí je zvoleno maximálně 32 V. Výpočet vychází ze základní rovnice (10) pro odporový napět'ový dělič. Po zvolení odporu R20 = 82k je rovnice upravena pro výpočet R21 (11). Dle této rovnice je z řady zvolen odpor 4k3. Rovnice (12) pak uvádí výpočet maximální vstupní amplitudy pro vypočtený dělič. Tato vychází z rovnice (10).

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} \quad (10)$$

$$R_{21} = \frac{R_{20}}{\left(\frac{U_{in}}{U_{out}} - 1\right)} = \frac{82000}{\left(\frac{32}{1,65} - 1\right)} = 4458\Omega \cong 4k3 \quad (11)$$

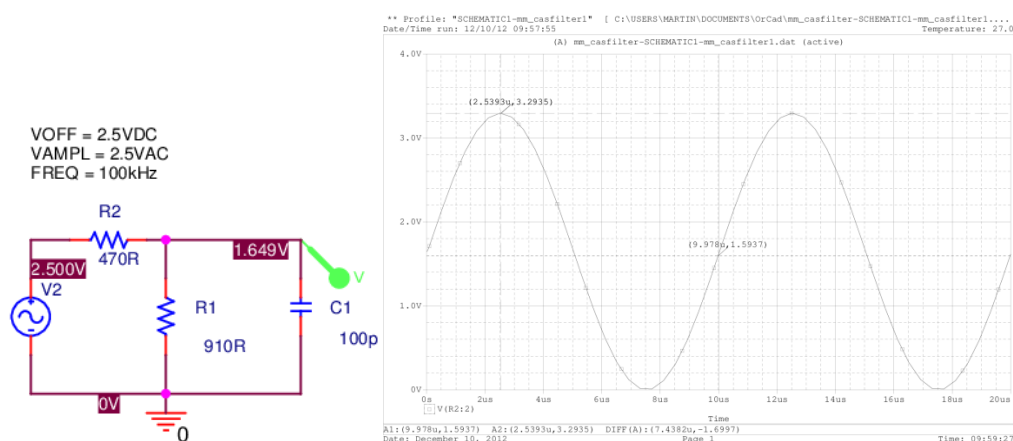
$$U_{in} = U_{out} \cdot \left(\frac{R_{20}}{R_{21}} + 1\right) = 1,65 \cdot \left(\frac{82000}{4300} + 1\right) = 33,115V \quad (12)$$



Obr. 17 – Proudový kanál

Vzhledem k nutnosti zapojení kondenzátoru na vstupu A-D převodníku, bylo nutno navrhnout napěťový odporový dělič tak, aby celkový obvod (dolní propust) byl schopen přenést signál o minimální frekvenci 100 kHz bez ztráty amplitudy. Kritická frekvence propusti musí proto být podstatně větší. Dále je nutno brát v úvahu maximální proud z výstupu převodníku CAS, který je dle katalogu 20 mA. [27]

Vzhledem ke složitosti návrhu byla provedena simulace obvodu pomocí simulačního programu OrCAD PsPice firmy Cadence. Simulace byla provedena jako časová analýza, kdy byly zadávány různé hodnoty odporů děliče R41-R42 tak, aby vždy dávaly poměr 0,66 a přitom dodržovaly maximální výstupní proud převodníku při plné kladné hodnotě výstupu. Následuje simulační schéma a výstupní graf simulace pro již zvolené odpory 470 Ω a 910 Ω .



Obr. 18 – Simulace filtru (obvod vlevo, graf výstupu vpravo)

Díky krátkodobým zvýšeným odběrům při roztáčení motoru musí převodníky vydržet až 80 A, byť je zadán požadavek na rozsah měření 30 A. Z tohoto důvodu je použit převodník CAS 25. Zapojena jsou pouze dvě vinutí, maximální měřitelný proud je tedy 50 A. [27]

5.3 Kalibrace

Každý kanál používá vlastní obvod pro úpravu signálu, či v případě měření proudů vlastní převodník (viz kapitola 5.2). Vzhledem k použití operačních zesilovačů a součástek s danou přesností je pro správné měření nutné všechny moduly kalibrovat. Tato podkapitola popisuje implementaci kalibrace pro měřicí modul. Popis a postup fyzické kalibrace se nachází v kapitole 8.

Obvody pro úpravu napěťových signálů nezanášejí z principu činnosti do signálu žádnou nelinearitu. Proudové převodníky CAS 25 obsahují linearizační obvod. Jejich převodní charakteristika je tedy rovněž lineární. Toto potvrzuje i měření v kapitole 9. Největší chybu měření zanáší nepřesnost součástek a A-D převodníků. Nejlepší je proto použít kalibraci pomocí přímky. [27]

$$y = x \cdot k_1 + k_2 \quad (13)$$

$$U = U_{A-D} \cdot k_1 + k_2 \quad (14)$$

Vychází se zde z rovnice přímky (13). Místo složky x se dosadí kód A-D převodníku a místo složky y je vypočteno napětí či proud (14). Jelikož se provádí měření jak kladných tak záporných hodnot, nachází se nulová měřená hodnota po úpravě signálu v polovině rozsahu. Tento bod je brán jako výchozí a tudíž jeden z bodů přímky. Pro lepší měření je pro každý kanál použita zvlášť kladná převodní přímka a zvlášť záporná. Vycházejí z těchto poznatků je vytvořena soustava dvou rovnic (15) a (16) pro určení konstant k_1 a k_2 .

$$U_1 = U_{A-D1} \cdot k_1 + k_2 \quad (15)$$

$$U_2 = U_{A-D2} \cdot k_1 + k_2 \quad (16)$$

$$k_1 = \frac{U_1 - U_2}{U_{A-D1} - U_{A-D2}} \quad (17)$$

$$k_2 = U_1 - U_{A-D1} \cdot k_1 \quad (18)$$

Rovnice (17) a (18) ukazují výpočet konstant. V těchto U_{A-D1} reprezentuje kód A-D převodníku, odpovídající měřené nule. Za U_{A-D2} se pak zadá co největší číslo v měřeném rozsahu (ať už kladném či záporném), nejlépe 30 V či 30 A. Výsledné konstanty jsou nicméně velmi malé, v případě k_1 mnohem menší než nula. Proto jsou před odesláním do modulu bitově posunuty o dvacet míst doleva, tedy vynásobeny hodnotou 2^{20} .

Tyto výpočty pro svou složitost neprovádí firmware mikrokontroléru. Vzhledem k potřebě připojení nadřazeného systému i řídicího počítače pro vizualizaci procesu kalibrace se výpočet konstant provádí v testovacím programu PC a tyto jsou modulu odesílány při ukončení kalibrace kanálu (viz kapitola 8).

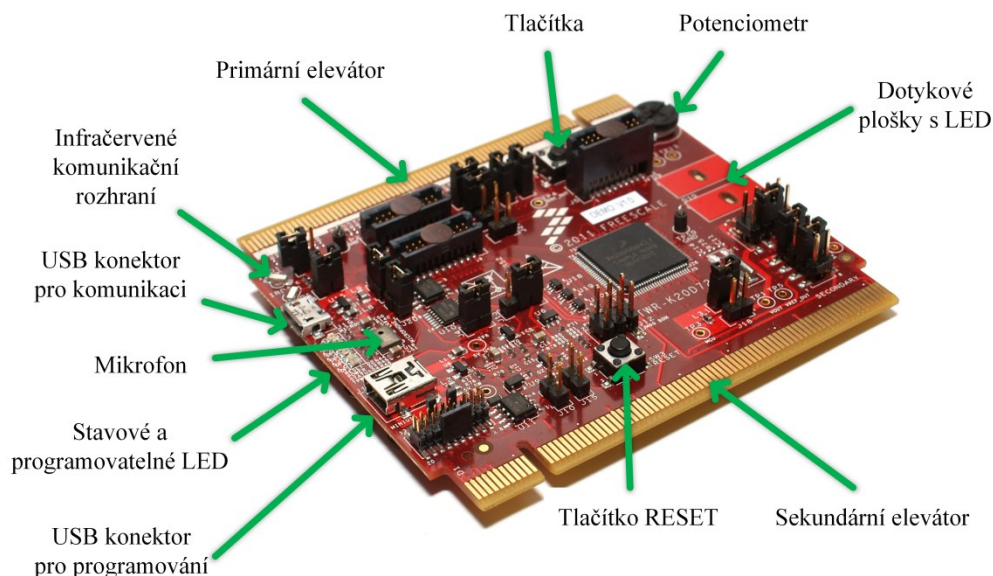
6 Realizace

Jak bylo zmíněno v předešlých kapitolách, měřicí modul bude řešen přímo na vývojové platformě Tower System firmy Freescale, popsané v kapitole 4.3. Tato kapitola bude obsahovat návrh desky plošného spoje ze zapojení, které byly popsány v předcházející kapitole. Deska bude navržena jako modul do systému Tower. Následuje popis řídicí desky a jejího procesoru.

6.1 Popis řídicí desky TWR-K20D72M

Řídicí deska je koncipována jako modul pro vývojový systém Tower. Tento levný modul obsahuje mikrokontrolér Kinetis K20 72 MHz. Modul je schopen pracovat samostatně nebo v zapojení systému Tower. Deska se vyznačuje následujícími vlastnostmi. [30]

- Funkce USB zařízení i hosta
- Programovací a ladící rozhraní OSBDM s procesorem S08JM60
- Čtyři uživatelsky řízené svítivé diody
- Dvě kapacitní dotykové plošky a dvě mechanická tlačítka
- Konektor pro připojení desky s dalšími kapacitními dotykovými ploškami
- Konektor pro připojení různých modulových desek (např. senzorový modul)
- Mikrofon, piezo a potenciometr, infračervené komunikační rozhraní
- Třiosý akcelerometr MMA8451Q
- Držák 20 milimetrové lithiové baterie
- Přepínač pro volbu napájecího napětí mikrokontroleru (3,3 V nebo 1,8 V) [30]



Obr. 20 – Řídicí deska TWR-K20D72M

6.2 Popis mikrokontroleru K20_72

Tento 32 bitový kontroler, obsažený v desce TWR-K20D72M popsané v minulé kapitole, je postavený na architektuře jádra ARM Cortex-M4 (viz kapitola 4). Vyrábí se ve velkém počtu verzí, lišících se počtem pinů a růzností periférií.

Tato verze kontroleru Kinetis obsahuje USB rozhraní ve verzi 2.0 s rychlostmi Full-Speed a High-Speed. Dále pak inovativní technologii paměti FLASH s unikátní možností použití paměti pro trvalé uložení dat (obdoba EEPROM). Nechybí ani bohatá nabídka analogových, komunikačních, časovacích a řídicích rozhraní. Některé verze obsahují i výpočetní jednotku pro čísla s pohyblivou desetinnou čárkou, rozhraní pro připojení kapacitních dotykových plošek, či řadič NAND paměti. [31]

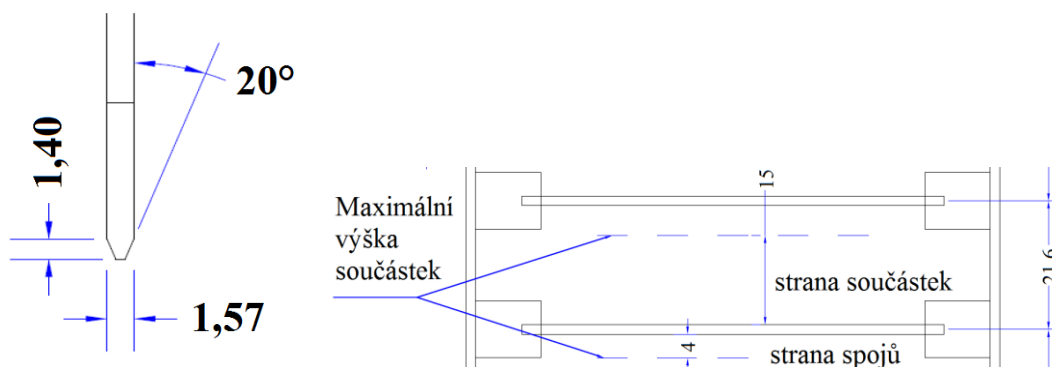
V této práci je použit typ MK20DX256VLL7. Tento se vyznačuje následujícími vlastnostmi a perifériemi.

- 32 bitové jádro ARM Cortex-M4 s instrukcemi pro zpracování digitálních signálů
- Maximální frekvence jádra 72 MHz
- Pouzdro LQFP100
- Rozsah napájecího napětí od 1,72 V do 3,6 V
- Rozsah provozních teplot od -40 °C do 105 °C
- 256 KB programové FLASH paměti a 64 KB statické RAM paměti
- Rozhraní externí sběrnice
- Deset různých režimů spotřeby
- Generátor hodinového signálu s módy běhu s PLL a FLL
- Dva 16 bitové aproximační analogově digitální převodníky
- Programovatelný zesilovač zisku (až do násobku 64), zabodovaný v každém ADC
- 12 bitový digitálně analogový převodník
- Rychlý analogový komparátor s 6 bitovým digitálně analogovým převodníkem
- Programovatelná napěťová reference
- USB 2.0 v režimech zařízení i hostitel s detekcí dobíjení zařízení
- Časovače pro periodické přerušení, osmi kanálové řízení motoru, generátor pulzně šířkové modulace, kvadrurní dekodéry, či hodiny reálného času
- Různé sériové komunikační rozhraní (SPI, I²C/SM-BUS, UART, IrDA, I²S)
- Modul pro řízení sběrnice CAN
- Řadič vstupně výstupních pinů s podporou přerušení
- DMA řadič obsahující 16 kanálů a až 63 požadavkových zdrojů
- Externí a softwarový hlídač programu (watchdog)
- Hardwarový CRC modul a 128 bitové unikátní identifikační číslo každého čipu
- Ladicí rozhraní JTAG [32]

6.3 Požadavky na modul systému Tower

Tato podkapitola popisuje výrobní požadavky pro návrh vlastního modulu vývojového systému Tower. Moduly se připojují pomocí elevátorů, tedy paralelně spojených PCI konektorů. Deska proto musí splňovat následující parametry. [33][34]

- Šířka desky 1,5 mm
- Zlacené PCI konektory o šířce 0,381 μm až 0,762 μm
- Rozměry desky 90 mm x 80,6 mm
- Zešikmené rohy desky u PCI konektoru (viz Obr. 21)
- Maximální výška komponent (viz Obr. 21)



Obr. 21 – Mechanické nákresy modulů [33][34]

Ačkoliv se standardně pro připojení PCI konektorů používá zlacených kontaktů, je možno využít levnější náhrady. Nejčastější jsou olovnatý či bezolovnatý cín, stříbro, nikl aj. Tyto jsou sice mnohem levnější, ale přinášejí s sebou problémy. Přikládání zmíněných náhrad na zlaté piny v PCI konektoru často způsobuje korozi, kontaminaci či přenos kovů. I přesto je lze použít ve vývojové aplikaci, kdy se neočekává dlouhé používání prototypu a časté přepojování (10 až 20 krát).

Vzhledem k nutnosti častého přepojování při výměně procesorové desky při ladění, jsou desky v této práci vyrobeny zlacené s následným galvanickým pozlacením vybraných PCI pinů v konektoru. Takto se zabrání jejich zničení a problémům při hledání chyby při nefunkčnosti. [33]

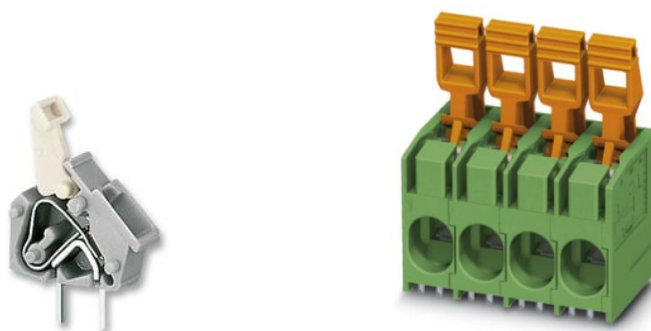
6.4 Návrh modulu do systému Tower

Tato podkapitola popisuje samotný návrh desky dle výše popsaných požadavků. Dále se zabývá popisem použitých konektorů.

6.4.1 Konektory

K modulu se budou připojovat měřené veličiny a komunikační sběrnice CAN. Pro připojení měřených napětí budou použity pružinové svorkovnice firmy Wago, a to kvůli snadné manipulaci při častém přepojování kabeláže při ladění modulu.

Pro připojení měřeného signálu k převodníku jsou použity pružinové svorkovnice PLH 16/2-10 firmy Phoenix Contact. Tyto jsou určeny pro pájení na desku plošných spojů a jsou schopny vést kontinuálně proud až 75 A. Svorkovnice jsou dvojité. Jedna svorkovnice je tedy zapojena jako vstupní a výstupní svorka jednoho kanálu. [35]



Obr. 22 – Konektory Wago (vlevo) a PLH 16/2-10 (vpravo) [35][36]

V rámci řešení projektu Měřicí a Testovací stanice bylo rozhodnuto, že sběrnice CAN bude rozvedena pomocí přímého kabelu UTP, a to především kvůli snadné dostupnosti a jednoduchosti přepojování. Každé zařízení na sběrnici bude obsahovat dva RJ45 konektory, jejichž piny budou spojeny. Toto lze již vidět na Obr. 19 v kapitole 5.2.4.



Obr. 23 – Konektor RJ45 (vlevo) a zapojení UTP kabelu (vpravo) [37][38]

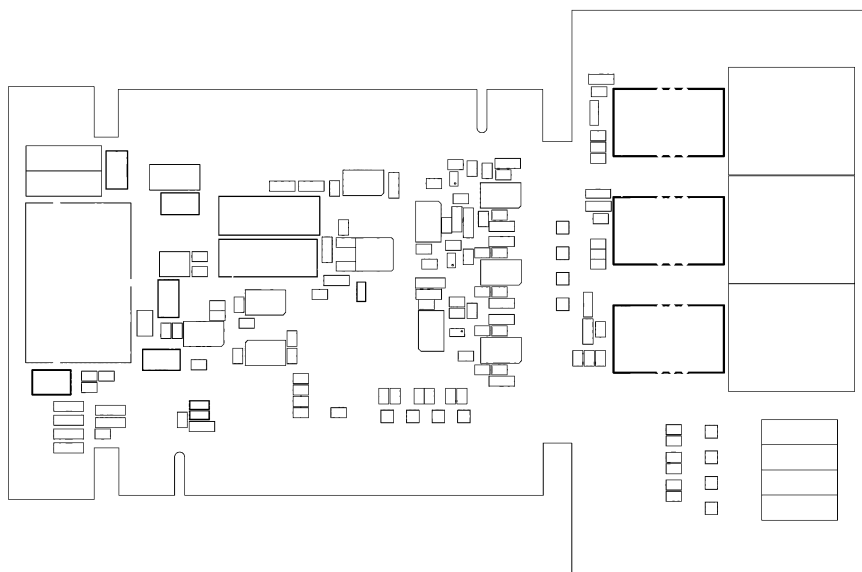
Na předešlém obrázku se nachází vybraný konektor a zapojení UTP kabelu. Zapojení kabelu je přímé. To vyplývá z faktu, že je použit pro propojení sběrnice, tudíž konektory všech zařízení musí být zapojeny stejně (viz kapitola 5.2.4).

Popis pinů UTP kabelu:

- 1, 2, 3, 6 – GND (0 V napájecího napětí)
- 4 – CANL
- 5 – CANH
- 7, 8 – +12 V (napájecí napětí)

6.4.2 Deska plošných spojů

Jak bylo uvedeno výše, deska plošného spoje musí být mechanicky navržena tak, aby ji bylo možno vložit jako modul do vývojového systému Tower. Rozměry a počet použitých konektorů neumožňují dodržení přesného tvaru modulu. Deska je nicméně navržena tak, aby se do vývojového systému dala připojit. Toto je řešeno protažením a následným rozšířením desky mimo Tower. Následující obrázek ukazuje rozvržení modulu. Mechanický výkres se nachází v příloze č. VII.



Obr. 24 – Deska plošného spoje modulu včetně osazení

Jak je z obrázku patrné, elevátory se připojují ke spodní (primární modul elevator) a horní (sekundární modul elevator) straně desky. Levá část obsahuje připojení ke sběrnici a napájecí části včetně galvanického oddělení a indikace napájení. Střední část skýtá měřicí část napěťových kanálů. V pravé části se nakonec nachází proudové snímače CAS 25 s konektory PLH 16/2-10 a pružinové svorkovnice pro připojení měřeného napětí.

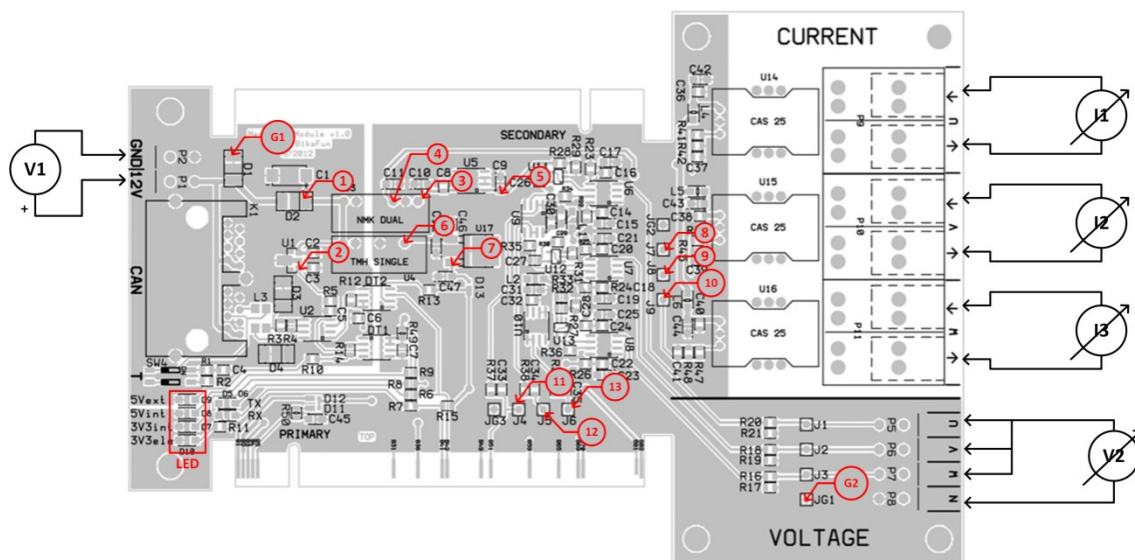
Vzhledem k velkým hodnotám proudu vedeného po desce od konektorů ke snímačům CAS 25, přičemž není úplně možné dosáhnout požadované tloušťky, jsou tyto cesty odmaskovány a na každé je připájen po celé délce drát. Požadovaná šířka cesty byla vypočtena pomocí kalkulátoru PCB TraceWidthCalculator, který počítá korektně pouze do 35 A. Pro tento proud byla vypočtena šířka cesty 15 mm, čehož nelze dosáhnout. [39]

Dále kvůli připojení desky do PCI konektoru je nutno odmaskovat celou plochu, která bude zasunuta do konektoru. Obrázek, popisující odmaskování desky plošného spoje, se nachází v příloze č. IV. V místě PCI konektorů je stejně odmaskovaná i strana součástek.

6.5 Oživení modulu

Následující podkapitola popisuje postup oživení modulu. Tento je nutný vzhledem k připojení modulu do systému Tower. Mohlo by tudíž dojít ke zničení procesorové desky přivedením nesprávné velikosti napětí, ať už napájecího či měřeného.

Následující obrázek ukazuje body pro připojení a testování desky pro úpravu signálů. Místa označená číslem jsou měřicí body. Místa značená G1 a G2 jsou nulové potenciály, tedy země. Tyto jsou od sebe galvanicky odděleny (viz kapitola 5.2.1) Veškerá měření se provádí voltmetrem se stejnosměrným rozsahem požadované hodnoty, a to mezi měřicím bodem a bodem G1 či G2. K měřicímu bodu G1 patří body 1a 2. K bodu G2 pak body 3 až 12. Bod 1 slouží k potvrzení napájecího napětí na neizolované straně, bod 2 pak pro kontrolu napětí 5 V pro řadič. Body 3, 4 a 6 jsou výstupy z izolovaných měničů, bod 5 a 7 ze stabilizátorů na 3,3 V a slouží ke kontrole napájení na izolované straně modulu. Body 8 až 10 jsou výstupy z převodníků proudu, a konečně body 11 až 13 patří k výstupům napěťových kanálů.



Obr. 25 – Zapojení pro oživení desky úpravy signálů včetně měřicích bodů

6.5.1 Postup oživení napájení

V této podkapitole je bodově popsán postup pro oživení napájení celého modulu, včetně popisu velikostí napětí a jejich rozptylu.

1. Na zdroji V1 se nastaví $12\text{ V} \pm 10\%$ a připojí se na pružinové svorkovnice 12 V a GND . Rozsvítí se všechny LED označené na Obr. 25.
2. Napětí mezi body 1 a G1 musí mít hodnotu v rozmezí $11,4\text{ V}$ a $12,8\text{ V}$.
3. Napětí mezi body 2 a G1 musí mít hodnotu $5\text{ V} \pm 10\%$.

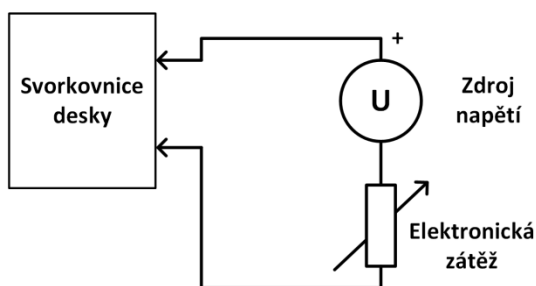
6.5.2 Postup oživení měření napětí

Po oživení napájení se přistoupí k oživení všech kanálů pro měření napětí. Jako zdroj V2 je použit laboratorní nastavitelný zdroj stejnosměrného napětí 0 V až 30 V . Pro nastavení záporné hodnoty napětí je třeba mezi sebou zaměnit přívodní vodiče.

1. Na zdroji V2 se nastaví $0\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$ a připojí se na pružinové svorkovnice U, V, W a N dle Obr. 25.
2. Napětí na bodech 11, 12 a 13 vůči G2 musí mít hodnotu $1,65\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.
3. Napětí V2 se zvýší na $+30\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.
4. Napětí na bodech 11, 12 a 13 vůči G2 musí mít hodnotu $3,0\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.
5. Zamění se přívodní vodiče V2 (pro vytvoření záporné hodnoty -30 V)
6. Napětí na bodech 11, 12 a 13 vůči G2 musí mít hodnotu $0,3\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.

6.5.3 Postup oživení měření proudu

Zdroje I1, I2 a I3 jsou proudové zdroje, vytvořené sériovým zapojením napěťového zdroje (nastaveného na 3 V) a proudové zátěže, viz následující obrázek.



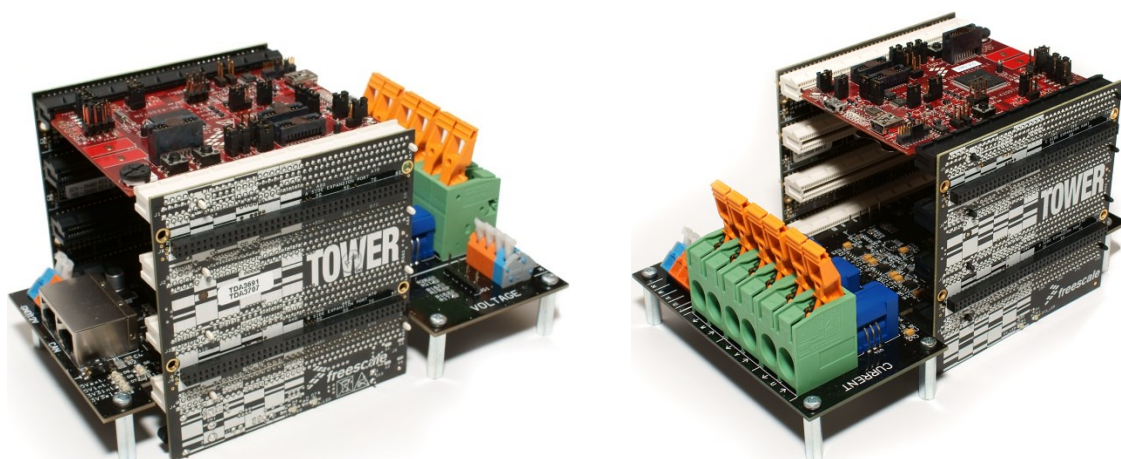
Obr. 26 – Zapojení zdroje proudu

1. Na zdroji I1 (elektronické zátěži) se nastaví 0 A a připojí se na pružinové svorkovnice U, dle Obr. 25.
2. Napětí mezi body 8 a G2 musí mít hodnotu $1,65\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.
3. Nastaví se proud I1 na $30\text{ A} \pm 0,1\text{ A}$.

4. Napětí mezi body 8 a G2 musí mít hodnotu $3\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.
5. Nastaví se proud I_1 na 0 A .
6. Zamění se přívodní vodiče I_1 (vytvoříme zápornou výchylku)
7. Nastaví se proud I_1 na $30\text{ A} \pm 0,1\text{ A}$.
8. Napětí mezi body 8 a G2 musí mít hodnotu $0,3\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$.
9. Nastaví se proud I_1 na 0 A . Pozor, nutné! Odpojíme od svorkovnice.
10. Body 1 až 9 se opakují pro zdroj I_2 a bod 9 a G2.
11. Body 1 až 9 se opakují pro zdroj I_3 a bod 10 a G2.

6.6 Sestavení celého modulu

Kompletní modul se sestaví spojením desky modulu s procesorovou deskou připojením modulů elevators. Je nutno dbát na jejich správnou orientaci, a je nutno dodržet typ modulu elevator (primární či sekundární, je vyznačeno na obou deskách). Procesorová deska se zapojí do nejvrchnějšího konektoru, deska na úpravu signálů do nejspodnějšího. Nejprve se obě desky zasunou do primárního modulu, poté je na ně nasazen modul sekundární. Následující obrázek ukazuje sestavený modul.



Obr. 27 – Sestavený modul

6.7 Systém pro návrh desky plošných spojů Formica

Pro vytvoření schématu a desky plošného spoje bude využito tuzemského systému Formica, který díky své příznivé ceně využívá jak spousta malých soukromých firem, tak velké nadnárodní společnosti. Rovněž se tento systém využívá na středních školách pro výuku. Hlavní výhodou je absence knihovnic souborů. Ty jsou nahrazeny přímo soubory schémat a desek. To znamená, že jakýkoliv vytvořený soubor se chová jako knihovna a lze z něj vybrat v něm použité (či uživatelem nakreslené) prvky do jiného souboru. Další výhodou je možnost použití klávesnice pro pohyb v menu a to ve formě jednoho písmena pro položku, což značně zrychluje celou práci. [40]

7 Firmware

Součástí práce je programování firmware mikrokontroléru. Pro časovou náročnost výpočtu kvůli značnému počtu vzorků bude program psán bez operačního systému. Pro snadnější programování a absence nutnosti psaní obslužných rutin pro řadič sběrnice CAN je použita utilita Processor Expert, která je integrována v rámci vývojového prostředí CodeWarrior for MCUs v10. Tato nová verze integruje vývojové prostředky pro kontroléry architektur ColdFire, DSC, Kinetis, Qorivva, PX, RS08, S08 a S12Z. Rovněž je postavena na otevřené vývojové platformě Eclipse, která nabízí především přehlednost a její hlavní výhodou je použití různými dodavateli vestavěných systémů. [41]

7.1 Processor Expert

Tato utilita je integrována přímo do vývojového prostředí pro mikrokontroléry Freescale. Umožňuje programátorovi zabývat se pouze řídicím algoritmem bez nutnosti studovat katalogový list použitého kontroléru, popřípadě nutnosti editovat již hotový projekt.

Processor Expert dovoluje vcelku snadno nastavit jak systémové registry jádra a jednotlivých periférií, tak vstupů i výstupů za použití grafického uživatelského prostředí, a následně vygenerovat inicializační kód v jazyce C. Generovány jsou i metody pro použití či programové nastavení periférií, jejichž voláním lze nastavit nebo přecházet hodnoty vstupu nebo výstupu, zahájit převod A-D převodníku, spustit časování, vyslat nebo přijmout data ze sériového rozhraní apod. Práce s ním je pro technika znalého obecné struktury mikrokontrolérů a jejich názvosloví velmi snadná a rychlá.

Výsledný vygenerovaný kód je přehledně strukturovaný, a to včetně komentovaného popisu všech generovaných metod a částí kódu. Do takto vygenerovaného kódu lze ihned přidat vlastní algoritmus a okamžitě projekt přeložit a nahrát do mikrokontroléru. [42]

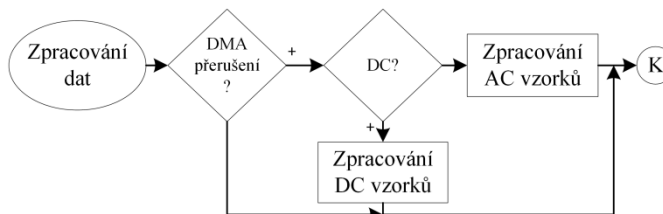
7.2 Popis firmware

Z periférií mikrokontroléru jsou použity oba analogově digitální převodníky, jeden na měření proudů, druhý na měření napětí (viz kapitola 5.2). Dále pak řadič přímého přístupu do paměti k jejich řízení pomocí flexibilního snímání (viz kapitola 4.4.1), ovladač sběrnice CAN pro komunikaci s nadřazeným systémem, časovač pro počítání periody pro odesílání vypočtených dat nadřazenému systému a nakonec řadič FLASH paměti pro uložení kalibračních konstant pro výpočet reálných hodnot proudu a napětí z dat A-D převodníků. V hlavní smyčce jsou volány tři hlavní funkce programu. [32]

- Zpracování změřených dat (včetně samotných výpočtů)
- Komunikace po sběrnici (odesílání i příjem dat)
- Změna komunikační adresy modulu pomocí tlačítka

7.3 Zpracování změřených dat

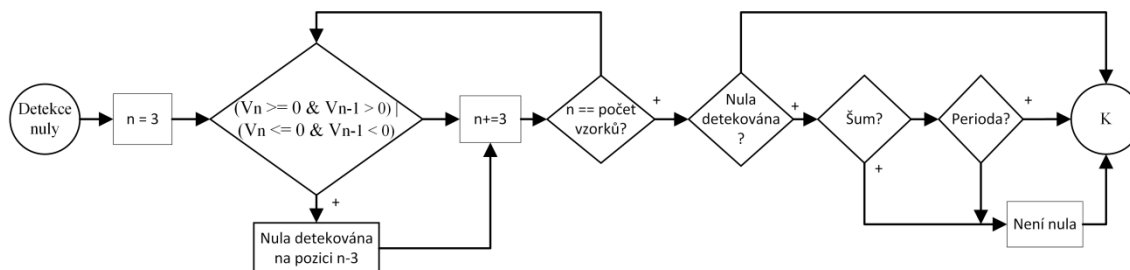
Každou milisekundu nastane přerušení od jednoho z kanálů DMA řadiče, signalizující dokončení měření sta vzorků na jeden měřicí kanál, dohromady tedy 300 vzorků na jeden A-D převodník. Dle druhu měřeného signálu jsou následně data v cyklu zpracována (Obr. 28).



Obr. 28 – Zpracování měřených dat

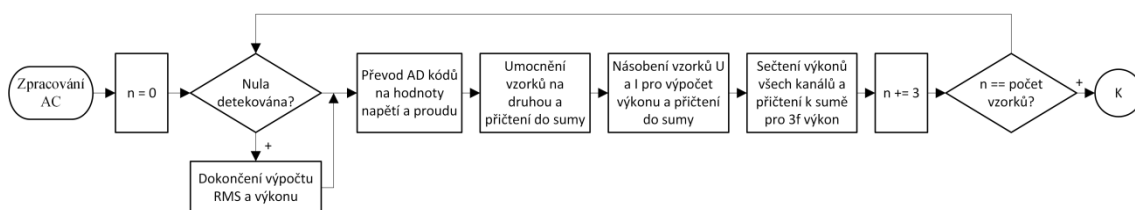
Pro stejnosměrné měření je počítán aritmetický průměr pro každý kanál ze sta vzorků. Tyto průměry jsou sčítány a před odesláním je z nich vypočítán další průměr. Z průměrů napětí a proudu jsou vypočteny výkony a data jsou odeslána.

Pro střídavé měření je nejprve na zvoleném kanálu nalezen průchod nulou. Postup pro jeden kanál jednoho převodníku je znázorněn na následujícím obrázku. Zde se vychází z předpokladu, že vzorek V_n je nad hranicí nuly, přičemž předešlý vzorek V_{n-1} je pod její hranicí. Tímto je detekován průchod nulovou hodnotou směrem ke kladné části. Opačně pak pro průchod směrem k záporné. Takto jsou v cyklu otestovány všechny nabrané vzorky, tj. 100 vzorků na kanál. Jak bylo vysvětleno v kapitole 4.4.1, jsou vzorky jednoho převodníku uloženy v jednom poli hodnot, je tedy testován každý třetí vzorek. Je-li průchod detekován, uloží se jeho pozice. Vzhledem k malé frekvenci měřeného signálu a především jeho tvaru je ukládán pouze jeden průchod v poli vzorků. Dále je nutno provést detekci šumu kolem nuly. Toto je důležité kvůli předpokládanému tvaru měřeného signálu (viz Obr. 12), kdy se průběh pohybuje okolo nuly po čtvrtinu periody. Nakonec je vybrán pouze každý druhý průchod, protože je nutno brát pouze celou periodu, nicméně kvůli šumu jsou detekovány průchody v obou směrech. Popsaná funkce vrací pozici vzorku, na kterém byl detekován průchod. V případě nenalezení průchodu je vrácen chybový kód kvůli dalšímu zpracování vzorků.



Obr. 29 – Detekce průchodu nulou

Na základě detekce průchodu nulou dochází k výpočtu efektivních hodnot všech kanálů a celkového činného výkonu z předešlých naměřených vzorků. Na Obr. 30 se nachází popis části kódu pro zpracování střídavých průběhů z naměřených vzorků. To je prováděno v cyklu, přičemž při každém průchodu jsou zpracovány vzorky stejného pořadového čísla (na obrázku označeného písmenem n) ze všech šesti kanálů. Samotnému zpracování vzorků předchází dotaz na detekci nuly v daném místě. Tato informace je vrácena předešlou funkcí pro detekci průchodu nulou. Pokud byla detekována nula, dochází k okamžitému výpočtu efektivních hodnot a činného výkonu ze vzorků nabraných v předešlých cyklech. Po tomto výpočtu jsou resetovány všechny čítače a pomocné paměťové buňky, je vystaven příznak pro odeslání dat a cyklus pokračuje dále ve zpracování vzorků pro další periodu.



Obr. 30 – Postup výpočtu RMS hodnot

Vzorky se zpracovávají následovně. Aby nedocházelo ke zbytečným problémům při zaokrouhlování a převodech kódu A-D převodníku na reálné hodnoty, výpočty nejsou prováděny přímo s kódy převodníků, dochází k okamžitému převodu každého vzorku na přibližně reálnou (vysvětleno níže) hodnotu ihned v cyklu. Z důvodu nutnosti kalibrace celého modulu pomocí rovnice přímky, a to zvláště pro zápornou a zvláště pro kladnou část, dochází při převodu k předávání nemalého množství dat. Při použití jednotné funkce s výpočtem procesor není schopen stíhat převody všech vzorků. Rovněž předávání pouze adres s kalibračními konstantami nestačí ke korektní optimalizaci kódu. Správného a rychlého provedení kódu je nakonec docíleno pomocí makra s parametry.

Makra s parametry se využívají místo velmi krátkých funkcí, například krátkého výpočtu. Při použití funkce nastává problém s efektivitou programu, kdy předávání parametrů, vrácení hodnoty a samotné volání funkce zabírá zbytečný procesorový čas a místa v paměti dat a může být ve výsledku delší, než samotný prováděný kód. Jazyk C proto nabízí možnost tento problém kompletně obejít, a to pomocí makra s parametry. Zde se ovšem zvětší délka prováděného kódu, kdy preprocesor vloží na místo názvu makra celý kód makra, přičemž argument doplní do kódu. [43]

```

#define adcToValueM(input,constantsChannel) (((input >= (constantsChannel).zero) ? (input *
(constantsChannel).positive.k1 + (constantsChannel).positive.k2) : (input *
(constantsChannel).negative.k1 + (constantsChannel).negative.k2))>> 10);
  
```

Výpis 1 – Makro pro převod kódu A-D převodníku na číslo

Jak je vidět na popisu makra výpis 1, pro snadnější zápis je použit podmíněný výraz (ternární operátor). Tento se používá pro snadnější zápis podmínky IF-THEN-ELSE. V popisu makra je využit pro použití správných konstant pro výpočet a přiřazení výsledku do proměnné. Většinou se podmíněný výraz nepoužívá, a to kvůli nepřehlednosti. V tomto případě je jeho použití ovšem mnohem snazší. [43]

```
tempValueVU = adcToValueM(voltage.values1[i], voltageConstants.channelU);
tempValueVV = adcToValueM(voltage.values1[i + 1], voltageConstants.channelV);
tempValueVW = adcToValueM(voltage.values1[i + 2], voltageConstants.channelW);
```

Výpis 2 – Použití makra v kódu (převod napětových vzorků)

Výpis 2 popisuje použití makra v kódu. Jako první parametr vstupuje prvek pole struktury pro napětí, tedy jeden změřený vzorek z napětového kanálu. Jako druhý parametr vstupuje struktura, naplněná kalibračními konstantami, v tomto případě pro napětové kanály U, V a W. Výsledek je přiřazen do proměnné před rovnítkem. Tímto je tedy splněna syntaxe ternárního operátoru.

Výše bylo zmíněno, že kódy vzorků A-D převodníku jsou převáděny na přibližně reálnou hodnotu. Aby bylo zajištěno co nejrychlejší provádění převodního kódu, je místo dělení a násobení použita rotace bitů, která je na 32 i 64 bitové proměnné provedena podstatně rychleji, než zmíněné aritmetické operace. Bitové rotace je ovšem možné použít pouze pro celočíselné proměnné. Celý firmware nicméně počítá s celočíselnými proměnnými, právě kvůli zmiňované potřebě co největší rychlosti zpracování kódu. Přesnosti se dosahuje bitovými rotacemi čísel, které jsou počítány v milivoltech a miliampérech. Třífázový výkon je převáděn přímo na watt, a to z důvodu přenosu velkého čísla (viz kapitola 7.4). [43]

Pro výpočet reálné hodnoty se používá následujícího výpočtu. Měřicí modul odesílá 16 bitové hodnoty všech proměnných. Z převodu kódu A-D převodníku na hodnotu napětí či proudu vychází číslo, jehož hodnota koresponduje s výpočtem (19).

$$U_{upravené} = U_{reálné} \cdot 2^{10}[-, V] \quad (19)$$

Převedené vzorky jsou posléze umocněny na druhou a přičteny k předešlým umocněným vzorkům. Tak je docílena část vzorce pro výpočet efektivní hodnoty uvnitř odmocniny (viz kapitola 3.1). Převedené vzorky napětí a proudu korespondujících kanálů jsou mezi sebou vynásobeny, je tedy vypočten okamžitý výkon a přičten k předešlým výpočtům výkonu. Nakonec jsou sečteny okamžité výkony všech kanálů, tím je vypočten okamžitý třífázový výkon. Tato hodnota je přičtena k ostatním okamžitým třífázovým výkonům v periodě a cyklus končí.

7.4 Komunikace

Modul reaguje na příkazy od nadřazeného systému kdykoliv. Jsou to kalibrační konstanty a změny typu měření a kanálu pro detekci průchodu nulou. Periodicky pak odesílají změřená data nadřazenému systému. Obojího je docíleno pomocí přerušení. Příjem reaguje na přerušení od řadiče CAN, odesílání pak na přerušení od periodického časovače každých sto milisekund. Aby se zabránilo zdržování hlavního kódu programu, tedy výpočtu měřených hodnot, v přerušení jsou pouze nastaveny příznaky (dvoustavové proměnné), přičemž v hlavní smyčce programu se na tyto příznaky kód dotazuje. Na základě tohoto dotazu se pak daná operace provádí.

Identifikační kód zpráv se zde používá pro adresaci celého modulu. Toto je zapříčiněno funkcí softwarového ovladače pro řadič CAN v utilitě Processor Expert. V nastavení řadiče se musí předem definovat vstupní vyrovnávací paměť, ke které je nutno zadat identifikační kód, na který bude paměť reagovat. Takovýchto vyrovnávacích pamětí lze definovat až osm. Toto nicméně nedostačuje pro všechny posílané zprávy. Proto je v prvním bajtu každého rámce uložen kód pro jeho identifikaci.

Následuje popis identifikačního kódu zpráv. Jedná se o číslo v hexadecimálním tvaru, jehož první cifra je vždy rovna jedné. Druhá cifra popisuje adresu modulu, jejíž změna je popsána v kapitole 7.4.3. Třetí cifra pak určuje, zdali se jedná o modulem vysílanou, či přijímanou zprávu.

- Vysílané z modulu: 0x1n0
- Přijímané modulem: 0x1n5

7.4.1 Odesílání dat nadřazenému systému

Vzhledem k maximální velikosti datového rámce (osm bajtů) modul periodicky odesílá čtyři rámce dat. Následuje jejich posloupnost.

1. Napětí (8 bajtů)
2. Proudů (8 bajtů)
3. Výkony (8 bajtů)
4. Třífázový výkon a typ měření (5 bajtů)

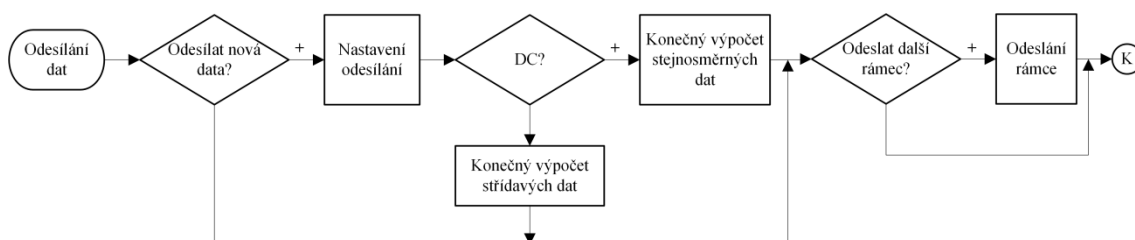
První bajt všech rámců nese kód identifikace rámce. V rámcích 1 až 3 pak následují tři hodnoty napětí (proudů či výkonů) o velikosti 2 B. Ve čtvrtém rámci je pouze jedna hodnota třífázového výkonu velikosti 2 B, následovaná údajem o typu měření (stejnoseměrné či střídavé s určením kanálu pro detekci nuly) velikosti 1 B. Všechny rámce jsou zakončeny hodnotou 0x77, která slouží jako informace o zakončení rámce. Posloupnosti bajtů v rámcích popisuje Obr. 31.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1.-3.	Identifikace rámce	Vyšší bajt kanálu U	Nižší bajt kanálu U	Vyšší bajt kanálu V	Nižší bajt kanálu V	Vyšší bajt kanálu W	Nižší bajt kanálu W	Zakončení rámce
4.	Identifikace rámce	Vyšší bajt výkonu	Nižší bajt výkonu	Typ měření	Zakončení rámce			

Obr. 31 – Posloupnost odesílaných rámců

Před samotným odesláním dat dochází ještě k poslednímu výpočtu průměrů hodnot každého kanálu. Pro měření stejnosměrných veličin se jedná pouze o další průměr již zprůměrovaných hodnot. Výsledek je tedy průměr z desetitisíce vzorků na jeden kanál. Takto se vypočítají napětí a proudy. Výkony jsou vypočteny až vynásobením těchto napětí a proudů.

Pro střídavé měření je vypočten průměr ze všech efektivních hodnot, změřených a vypočtených v intervalu mezi odesláním. Jejich počet se tedy mění s velikostí frekvence měřeného signálu. Toto platí i pro třífázový výkon. Modul umí měřit i frekvence menší, než je frekvence odesílání dat. V takovémto případě jsou opakovaně odeslány staré hodnoty, a to dokud není změřena a vypočtena celá perioda.



Obr. 32 – Diagram odesílání dat nadřazenému systému

Na Obr. 32 se nachází diagram odesílání. Jak bylo zmíněno výše, je tato funkce volána vždy v hlavní smyčce. Po konečném výpočtu dochází k postupnému odeslání všech čtyř rámců. Softwarový ovladač řadiče CAN povoluje zadat k odeslání jeden datový rámec, jehož samotné odeslání řeší vnitřní režie ovladače a řadiče. V rámci funkce pro odesílání dat se tedy přímo v hlavní smyčce nachází dotaz na odesílání nastavených rámců, kdy se zjišťuje, zdali se vůbec má odesílat, a pokud ano, tak který rámec. Kód rovněž zjišťuje, jestli byl již odeslán předcházející rámec. Tímto je docíleno toho, že při probíhající odesílání rámce je program schopen zpracovávat měřené vzorky, jelikož čas odeslání rámce není tak důležitý, jako zpracování vzorků.

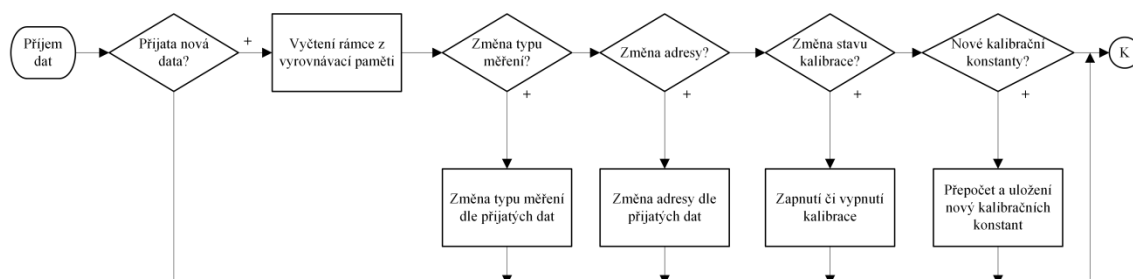
Při kalibraci modulu se odesílají pouze dva rámce, a to přímo kódy A-D převodníků jednotlivých kanálů. Z těchto je před odesláním vypočten aritmetický průměr.

7.4.2 Příjem dat od nadřazeného systému

Dotaz na zpracování přijatých dat se nachází opět v hlavní smyčce. Měřicí modul reaguje na následující typy příchozích zpráv.

- Nastavení kanálu pro detekování průchodu nulou
- Změna adresy modulu
- Zapnutí či vypnutí kalibrace
- Nové kalibrační konstanty

Na Obr. 33 se nachází diagram příjmu dat. Pokud byla přijata nová data, dochází k jejich vyčtení z vyrovnávací paměti ovladače řadiče CAN a na základě prvního bajtu je rámec identifikován a je provedena příslušná operace.



Obr. 33 – Diagram příjmu dat z nadřazeného systému

Změna typu měření, adresy i stavu kalibrace mají každá jeden vlastní rámec. Ten se vždy skládá z identifikačního bajtu, bajtu určujícího danou změnu či nastavení a z koncového bajtu. Vzhledem k velikosti a počtu kalibračních konstant jsou tyto rozděleny do více rámců, a to následovně. Do jednoho rámce jsou umístěny konstanty K1 a K2. Je tedy třeba dvou rámců pro odeslání pozitivních i negativních konstant. Ve zvláštním rámci se pak odesílá kalibrační nula. Pro jeden kanál je nutno odeslat tři rámce. Kalibrační konstanty byly blíže popsány v kapitole 5.3.

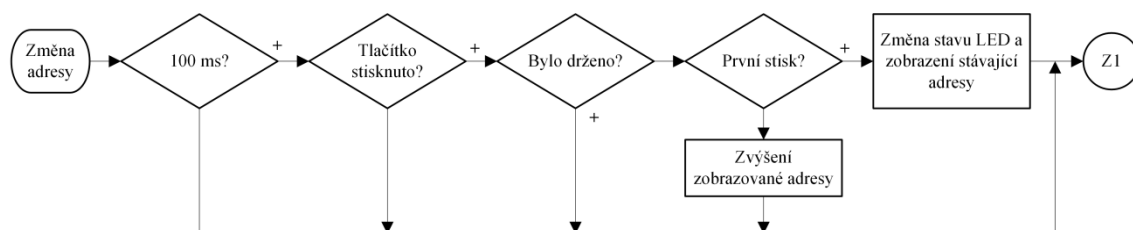
	1	2	3	4	5	6	7	8
a)	Identifikace rámce	Vyšší bajt K1	Nižší bajt K1	Vyšší bajt K2	Střední levý K2	Střední pravý K2	Nižší bajt K2	Zakončení rámce
b)	Identifikace rámce	Vyšší bajt nuly	Nižší bajt nuly	Zakončení rámce				

Obr. 34 – Přijímané rámce kalibračních konstant (a) a nuly (b)

7.4.3 Změna komunikační adresy

Vzhledem k faktu, že v systému stanice budou moduly dva, je nutné měnit operativně jejich komunikační adresu. K tomu je využito jediného tlačítka na procesorové desce a dvou LED pro zobrazení nastavené adresy.

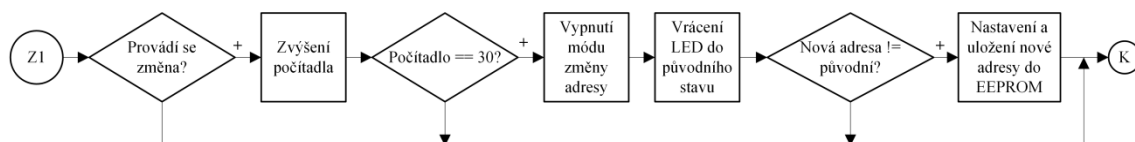
Funkce pro zjištění stavu tlačítka a provedení požadované reakce se nachází přímo v hlavní smyčce. Aby se předešlo nežádoucím zákmitům mechanického tlačítka, které se pohybují od desítek mikrosekund až po stovky milisekund u těch nejlevnějších, dotaz na stav tlačítka se provádí periodicky. Vzhledem k použitému tlačítku (standardní taktilní tlačítko) a rovněž vzhledem k faktu, že je k pinu mikrokontroleru připojeno přímo bez filtračního obvodu, který by zákmity odrušil, je perioda nastavena na 100 milisekund. Tlačítko rovněž reaguje pouze na stisk. Držením tlačítka se neprovádí žádná akce. [44]



Obr. 35 – První část změny adresy, ošetření tlačítka

Na Obr. 35 se nachází první část kódu pro ošetření tlačítka a změnu adresy. Časování 100 milisekund je prováděno pomocí časovače v rámci přerušení, kdy je použit časovač pro časování odesílání dat. Je-li nastaven příznak z přerušení a uběhlo tedy 100 milisekund, nastává dotaz na stisk tlačítka. Pokud je stisknuto a nebylo drženo, čímž se rozumí, že nebylo stisknuto již předtím a reakce na stisk již neproběhla, je třeba zjistit, zdali se jedná o první nebo již opakovaný stisk.

Po prvním stisku tlačítka se modul přepne do nastavování adresy a na LED se zobrazí stávající adresa. Opakovaným stiskem dochází k cyklování adres 0 až 4. Zvolená adresa se potvrdí tří sekundovým intervalem, kdy není tlačítko stisknuto. Adresa je poté okamžitě nastavena, uložena do paměti a modul se přepne do normálního běhu. Měření intervalu a nastavení adresy popisuje Obr. 36, který navazuje na Obr. 35.



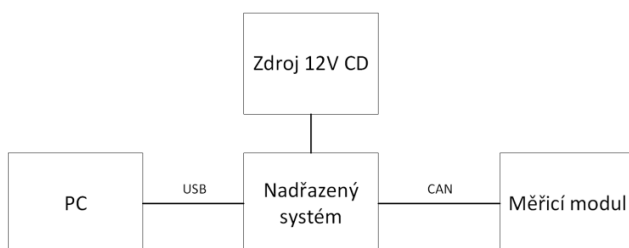
Obr. 36 – Druhá část změny adresy, nastavení adresy

8 Fyzická kalibrace modulu

Tato kapitola popisuje postup kalibrace hotových a naprogramovaných modulů. Ačkoliv program obsahuje základní kalibrační konstanty již při prvním naprogramování, je nutné každý modul kalibrovat zvlášť.

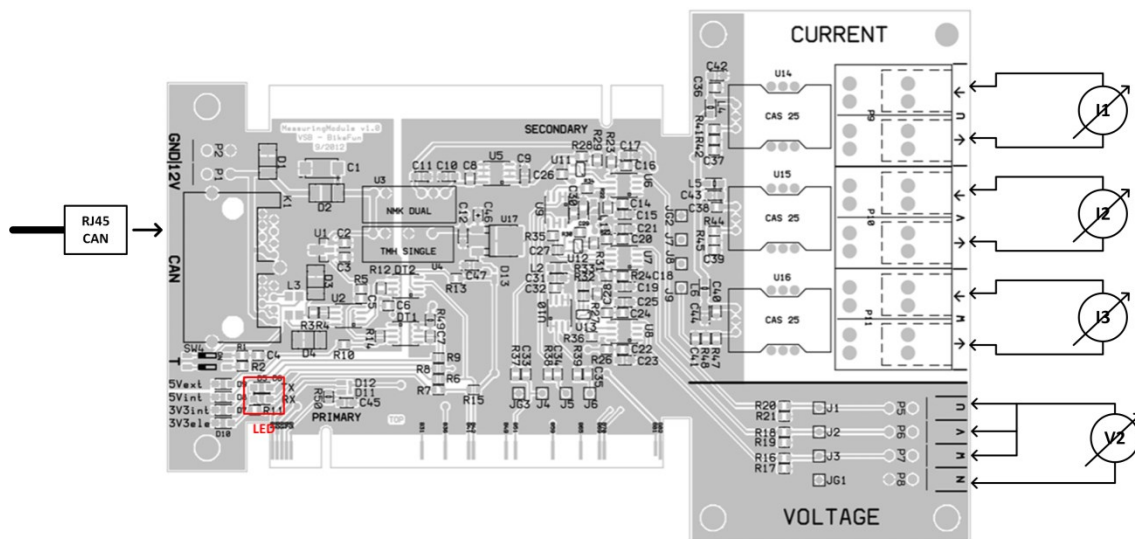
8.1 Zapojení pro kalibraci

Kalibrace modulu se provádí až při připojení nadřazeného systému, který spojuje CAN sběrnici modulu s počítačem přes USB. Po kabelu sběrnice je vedeno i napájecí napětí pro modul, tudíž se k napájecím svorkovnicím modulu nic nepřipojuje.



Obr. 37 – Zapojení systému pro kalibraci modulu

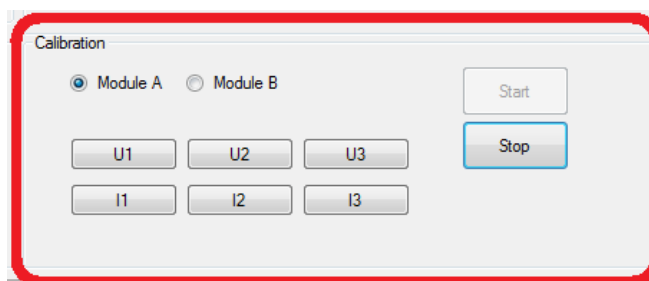
Po zapojení nadřazeného systému k napájení a následného připojení modulu na sběrnici CAN pomocí RJ45 konektoru se na modulu rozsvítí velká zelená LED a musí svítit trvale. To signalizuje korektní komunikaci mezi modulem a nadřazeným systémem. Blikáním naopak signalizuje poruchu sběrnice. Rovněž musí blikat komunikační LED, vyznačené na následujícím obrázku.



Obr. 38 – Zapojení pro kalibraci modulu

Modul se posléze zapojí dle Obr. 38 kvůli kontrole funkčnosti měření a kalibraci. Zapojení se shoduje se zapojením pro oživení modulu, včetně postupu měření (viz kapitola 6.5). Kontrola a kalibrace se provádí pomocí testovacího programu v PC. Jak bylo řečeno v kapitole 5.3, program provádí vizualizaci kalibrace a výpočet kalibračních konstant. Tento program nebyl vytvořen v rámci této práce, ale pro testování celého systému měřicí a testovací stanice, proto zde nebude jeho funkčnost blíže popisována.

V příloze č. VIII se nachází obrázek programu. V horní části se nachází nastavení COM portu a tlačítka Start (či Stop) pro připojení (či odpojení) komunikace. V levé části se nachází přijatá měřená data z Měřicího modulu. Levý sloupec pro adresu modulu 0, pravý pro adresu 1. V pravé vyznačené části se nachází kalibrace modulu (viz Obr. 39), jejíž postup následuje.



Obr. 39 – Výřez programu pro testování systému

8.2 Postup kalibrace

1. Stiskem tlačítka Start v sekci Calibration (na obrázku vyznačena červeně) se všechny připojené měřicí moduly přepnou do módu kalibrace (signalizují rozsvícením modré LED). V tomto módu neposílají měřené veličiny, nýbrž data přímo z ADC.
2. Pomocí přepínače se nastaví, který modul se bude kalibrovat (Module A či Module B).
3. Stiskem tlačítka U1 až U3 a I1 až I3 se spustí kalibrace požadovaného kanálu (kalibruje se vždy jen jeden kanál). Tlačítka U1 až U3 se spouští kalibrace napěťových kanálů U, V a W, tlačítka I1 až I3 spouští kalibrace proudových kanálů U, V a W.
4. Dojde k výzvě nastavení nulové hodnoty signálu na vstupu kanálu, tato se musí na kalibračním přístroji nastavit a potvrdit.
5. Dále dojde k výzvě pro nastavení určité záporné hodnoty signálu na vstupu kanálu. Její hodnotu lze ve výzvě změnit (např. kvůli omezení zdrojů kalibračních signálů), je ale vhodné, aby byla co nejblíže maximálnímu rozsahu kanálu. Tato se pak musí přivést na vstup kanálu a v programu potvrdit.
6. Bod 5. se opakuje pro nastavení kladné hodnoty. Po jejím potvrzení jsou vypočítány a odeslány kalibrační konstanty pro kalibrovaný modul.
7. Takto se opakují body 3. až 6., dokud nejsou kalibrovány všechny kanály.
8. Stiskem tlačítka Stop je kalibrace ukončena a moduly se přepnou opět do módu měření, ve kterém se nacházely před kalibrací (DC, AC atd.)

9 Testování

Vyrobené zařízení je třeba testovat na správnou funkčnost. Tato kapitola popisuje testování modulu, a to konkrétně měření odběru celého zařízení a přenosové charakteristiky napět'ových a proudových kanálů. Nakonec pak testování detekce průchodu signálu nulou.

9.1 Proudový odběr

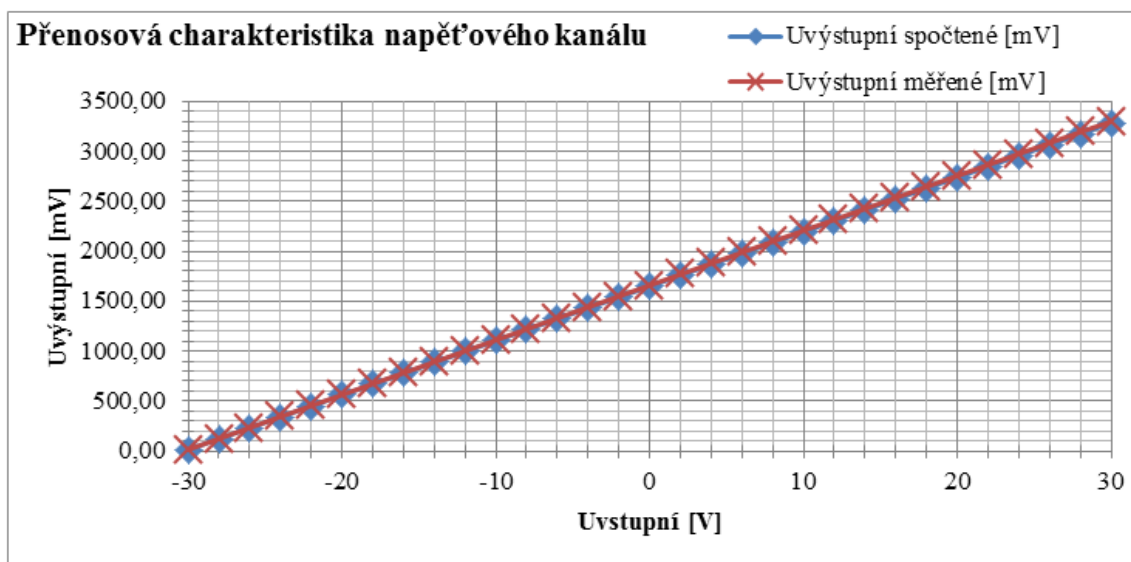
Proudový odběr byl změřen bez připojených kanálů či sběrnice CAN. Nejprve byla změřena pouze deska pro úpravu signálů, posléze i kompletní sestavený modul. Výsledky měření ukazuje Tabulka 1.

Měřený objekt	Vstupní proud [mA]
Deska pro úpravu signálů	80
Kompletní modul	140

Tabulka 1 – Měření odběru zařízení

9.2 Napět'ové kanály

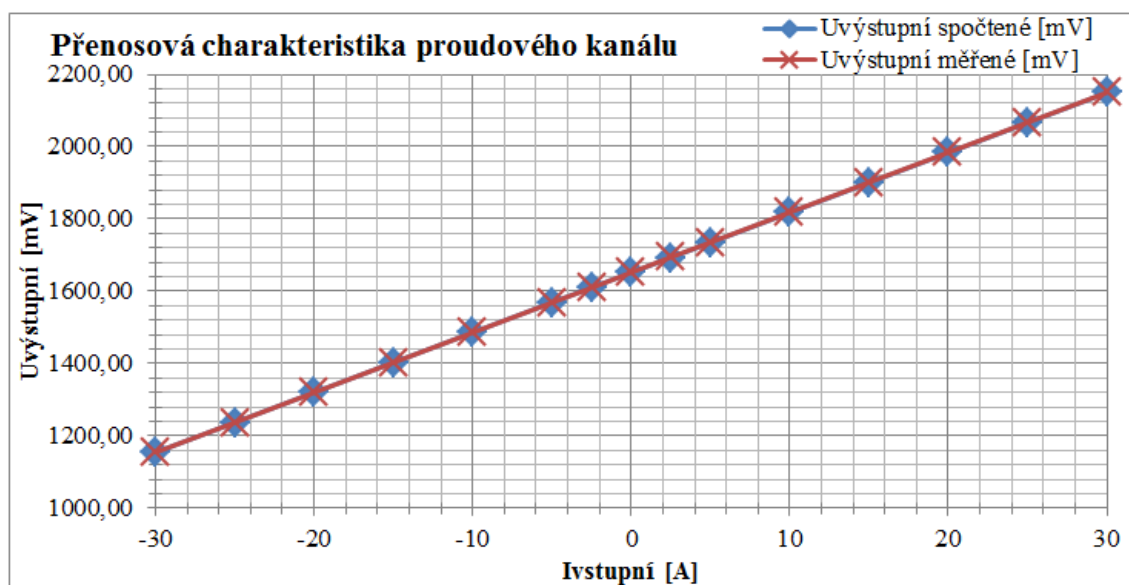
Cílem tohoto testování bylo ověření funkce zapojení napět'ového kanálu, a to jeho schopnost úpravy signálu na požadovaný tvar pro změření mikrokontrolérem. Především ovšem potvrzení linearit'y této úpravy. K tomu bylo použito zapojení popsané na Obr. 25 v kapitole 6.5, přičemž byl měřen pouze první kanál. Následuje graf přenosové charakteristiky. Zde je vynesena křivka měřeného i vypočteného napět'í. Tabulka vypočtených a změřených hodnot se nachází v příloze č. X. Jak je patrné, přenos je lineární a příliš se neliší od vypočtených hodnot.



Obr. 40 – Přenosová charakteristika napět'ového kanálu

9.3 Proudové kanály

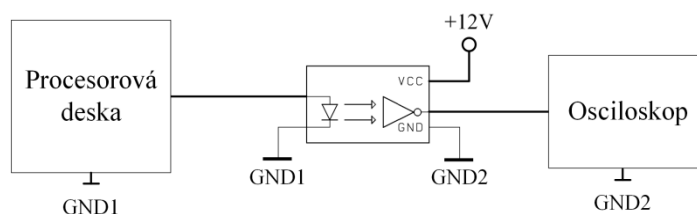
Podobně jako u předcházející podkapitoly, i zde bylo cílem ověřit funkci zapojení proudových převodníků CAS 25. Měření bylo provedeno na stejném zapojení (Obr. 25 v kapitole 6.5), kdy byl místo proudového zdroje použit zdroj napěťový a elektronická zátěž, popsaná na Obr. 26. I zde byla změřena přenosová charakteristika zapojení. Následuje její graf, tabulka změřených a vypočtených hodnot se nachází v příloze č. XI. Z této je patrné, že přenos je lineární a neodchyluje se příliš od vypočtených hodnot.



Obr. 41 – Přenosová charakteristika proudového kanálu

9.4 Detekce průchodu nulou

Algoritmus detekce průchodu nulou byl laděn a testován na sinusovém průběhu definované amplitudy a frekvence. Moment detekce byl posléze vizualizován na osciloskopu pomocí přístupného pinu na procesorové desce, připojeného přes optočlen kvůli galvanickému oddělení (viz Obr. 42).



Obr. 42 – Zapojení pro vizualizaci detekce průchodu nulou

Následující obrázky ukazují výsledky detekce průchodu nulou na sinusovém signálu o nastavené frekvenci 100 Hz (reálná hodnota 103,3 Hz je způsobena generátorem signálu). V levé části je zobrazen průběh detekce jakéhokoliv průchodu nulou. V části pravé je pak zobrazen průběh po úpravě algoritmu pro detekci pouze celé periody.



Obr. 43 – Průběhy detekování průchodu signálu nulou (a) a celé periody (b)

Jak je vidět na Obr. 43, pracuje algoritmus detekce průchodu signálu nulovou hodnotou správně, a to i přes šum, který je superponován na sinusový průběh, čímž způsobí vícenásobný detekovatelný průchod nulou. Díky tomuto stačí brát v úvahu každý druhý průchod ke zjištění celé periody signálu (jak je vidět na pravé straně Obr. 43).

Pro korektní funkčnost, kdy se frekvence řízení motoru mění, bylo testování prováděno na intervalu frekvence od 5 Hz do 150 Hz, přičemž průběh proudu do motoru nepřekračuje hodnotu 130 Hz. Algoritmus detekce v tomto intervalu pracuje korektně. Až při frekvenci vyšší než 150 Hz dochází ke ztrátám průchodů, což je zapříčiněno algoritmem detekce. Tento zjišťuje pouze jeden průchod nulou na polí vzorků od DMA řadiče. Rovněž problém způsobuje algoritmus pro detekci šumu kolem nuly. Ten vyžaduje několik polí vzorků pro správnou funkci.

Testování tedy potvrzuje správnost návrhu a funkčnost desky pro úpravu signálu. Dále pak ukazuje správnost odhadu periody měřeného signálu pomocí algoritmu detekce průchodu signálu nulovou hodnotou.

10 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout měřicí systém pro Měřicí a Testovací stanici elektrických kol E-Bike firmy BikeFun International. Ze zadaných požadavků na měřicí systém, které vycházejí z použitého elektrického kola, byl navržen měřicí modul tak, aby mohl být umístěn v rozváděči stanice pro měření stejnosměrných veličin a dále aby mohl být mobilní a dal se tedy usadit co nejbližší kola.

Dále bylo navrženo schéma zapojení měřicích obvodů modulu tak, aby bylo možné měřit na třífázovém bezkartáčovém motoru kola s ohledem na galvanické oddělení modulu od zbytku stanice. Rovněž bylo navrženo komunikační rozhraní pro sběrnici CAN, která je přítomna ve stanici, včetně jejího galvanického oddělení od modulu.

Z výše uvedeného zapojení byla navržena a vyrobena deska plošného spoje s ohledem na připojení k elevátorům vývojové platformy Tower System firmy Freescale Semiconductors, díky čemuž se značně zjednodušil vývoj i testování celého systému. Fotodokumentace modulu a rozváděče měřicí a testovací stanice se nachází v přílohách č. VI a č. IX.

Po návrhu a výrobě modulu byl popsán kompletní postup pro oživení vyrobeného modulu pro případ výroby více kusů. Dále byla popsána fyzická kalibrace modulu, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků měření.

V práci byl naprogramován a odladěn firmware měření a výpočtu stejnosměrných i střídavých veličin, tedy jejich efektivních hodnot, a celkového třífázového činného výkonu bezkartáčového motoru kola. Firmware dále změřené a vypočtené hodnoty odesílá nadřazenému systému stanice po průmyslové sběrnici CAN.

Práce je zakončena testováním kompletního zařízení pro ověření správnosti návrhu vstupních obvodů pro úpravu měřeného signálu na měřitelný tvar. Následovalo testování korektní funkčnosti algoritmu pro detekci průchodu měřeného signálu nulovou hodnotou, který se využívá pro odhad délky periody signálu pro výpočet efektivních hodnot a činného třífázového výkonu. Testování potvrdilo správnost návrhu a funkčnost kompletního vyrobeného zařízení, včetně správnosti programovaných algoritmů.

Měřicí modul byl vyroben a umístěn do rozváděče měřicí a testovací stanice a připojen k řídicí jednotce stanice. Rozváděč byl v listopadu roku 2012 dodán a namontován firmě BikeFun International, kde byl posléze otestován spolu s ovládacím programem, vyvíjeným externí firmou. V lednu roku 2013 byl vyroben druhý modul, který byl připojen ke stanici jako mobilní modul pro měření na motoru kola.

11 Použitá literatura

- [1] Powerflex D24 Lady. *Rockmachine* [online]. 2013 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.rockmachine.us/cz/e-bikes/powerflex-d24-lady.html>
- [2] BAXTER, L. K. Capacitive sensors: design and applications. New York, N.Y: IEEE Press, 1997. ISBN 07-803-5351-X.
- [3] LEPKA, J., GRASBLUM, P. Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory: Učební texty ke kurzu. VUT V BRNĚ. *Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií*[online]. 2011 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf
- [4] BLAHOVEC, A. *Elektrotechnika*. 4., nezm. vyd. Praha: Informatorium, 2002, 291 s. ISBN 80-860-7391-2.
- [5] NOVOTNÝ, M., SEDLÁČEK, M. *Měření efektivní hodnoty s využitím algoritmů DSP v prostředí MATLAB* [online]. 2004 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab04/novotny_sedlacek.pdf
- [6] Elektrické měření: MĚŘENÍ VELIČIN. *Školní stránky Ing.Jiřího Smílk*a [online]. 2005 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/mereni%203%20mereni%20el%20velicin%20skripta.pdf>
- [7] GOULART, T.J., D. CONSONNI, D. Automated system for measuring electrical three-phase power components. *IEEE Transactions on Education*. 2001, vol. 44, issue 4, s. 336-341. DOI: 10.1109/13.965781. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=965781>
- [8] Haasz, V., Sedláček, M.: *Elektrická měření. Přístroje a metody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [9] Company Profile - ARM. ARM HOLDINGS. *ARM - The Architecture for the Digital World* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.arm.com/about/company-profile/index.php>
- [10] Cortex-M Series - ARM. ARM HOLDINGS. *ARM - The Architecture for the Digital World* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/index.php>

- [11] Kinetis ARM® Cortex Microcontrollers. *FreescaleSemiconductor*[online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z:
<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=KINETIS>
- [12] Kinetis K SeriesMicrocontrollers. *FreescaleSemiconductor* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z:
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=KINETIS_K_SERIES
- [13] FREESCALE. *Freescale Tower System* [online]. 2012 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z:
http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/TWRFS.pdf?tid=m32TWR
- [14] Tower SystemController/ProcessorModules. *Freescale Semiconductor*[online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z:
<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=TWR-CONTROLLER-MOD&tid=m32TWR>
- [15] TWR-ELEV: Tower SystemElevator Module. *Freescale Semiconductor*[online]. 2011 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z:
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=TWR-ELEV
- [16] PETERKA, J. DMA. *EArchiv.cz: Archiv článků a přednášek Jiřího Peterky* [online]. 2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a93/a325c120.php3>
- [17] VACULÍK, L. FREESCALE SEMICONDUCTOR, Inc. *Using DMA to Emulate ADC FlexibleScan Mode on Kinetis K Series: AN4590*. 0. vyd. 2012. Dostupné z:
http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/app_note/AN4590.pdf?fp=1
- [18] DC motor Série PDS132190 s planetovou převodovkou. *Transmotec* [online]. 2013 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.transmotec.cz/dc-motory-prevodovka-planetova/serie-pds132190.html>
- [19] Datasheet k NMK1205SC. *MurataPowerSolutions* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: http://www.murata-ps.com/data/power/ncl/kdc_nmk.pdf
- [20] Datasheet k TMH1205S. *TracoPower* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.tracopower.com/fileadmin/medien/dokumente/pdf/datasheets/tmh.pdf>
- [21] Datasheet k SMBJ30CA. *FairchildSemiconductor* [online]. 2011 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/SM/SMBJ30CA.pdf>
- [22] Datasheet k SN65HVD1050D. *Texas Instruments* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd1050.pdf>

- [23] Datasheet k LE33. *STMicroelectronic* [online]. 2012 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000545.pdf>
- [24] Datasheet k LF33. *STMicroelectronic* [online]. 2012 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000546.pdf>
- [25] Výpočty chlazení elektronických součástí s řešenými příklady. SOU technické Chotěboř [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [26] Datasheet k ACS712. *Allegro MicroSystems* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>
- [27] Datasheet k CAS 25. *LEM* [online]. 2012 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/cas%20series.pdf>
- [28] Datasheet k HCPL-0601. *Avago Technologies* [online]. 2010 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0940EN>
- [29] Datasheet k B82789C113N2. *EPCOS* [online]. 2008 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: http://www.epcos.com/inf/30/db/ind_2008/b82789c0_s0.pdf
- [30] *TWR-K20D72M User's Manual* [online]. 2011 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user_guide/TWR-K20D72M_UM.pdf?fp=1
- [31] *Kinetis K20 Family: Low-power MCUs with USB On-The-Go* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/KNTSK20FMLYFS.pdf?fp=1
- [32] Datasheet k MK20DX256VLL7. *Freescale Semiconductors* [online]. 2012 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/data_sheet/K20P100M72SF1.pdf?fp=1
- [33] *Creating your own Tower Module*. [online]. 2011. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/32bit/doc/app_note/AN4390.pdf
- [34] *Tower Mechanical Drawing*. [online]. 2010. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/32bit/doc/app_note/AN4390.pdf

- [35] PLH 16/2-10. *Phoenix Contact* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://eshop.phoenixcontact.cz/phoenix/treeViewClick.do?reloadFrame=true&UID=1770393&parentUID=852634946>
- [36] WAGO - 256-744 - TERMINAL BLOCK, PCB. *ELEMENT14. Farnell* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/wago/256-744/terminal-block-pcb/dp/4015411?Ntt=4015411>
- [37] WURTH ELEKTRONIK - 615016137621 - JACK, RJ45, HORIZ, 8P8C, SHIELDED, DUAL. *ELEMENT14. Farnell* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/wurth-elektronik/615016137621/jack-rj45-horiz-8p8c-shielded-dual/dp/1841174?Ntt=1841174>
- [38] Tipy a triky: Zapojení konektoru RJ45. *BigBossSite* [online]. 2011 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://olmic.eu/tipy.html>
- [39] PCB TraceWidthCalculator. *TheCircuitCalculator*[online]. 2006 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator>
- [40] HORSKÝ, Petr. *Formica 4.2 : návrhový systém pro plošné spoje : editor plošného spoje a autorouter : příručka uživatele*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 190 s. ISBN 80-86056-34-1.
- [41] CodeWarriorforMCUs (Eclipse IDE) - ColdFire, 56800/E DSC, Kinetis, Qorivva 56xx, PX Series, RS08/S08, S12Z. FREESCALE SEMICONDUCTORS, Inc. *Freescall* [online]. 2012 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=CW-MCU10&tid=CWH
- [42] VOJÁČEK, A. *Hw.cz* [online]. 25.3.2008 [cit. 2011-04-18]. Processor Expert - snadné nastavení MCU a periférií jen klikáním myši. Dostupné z: <http://hw.cz/teorie-praxe/programovani/art2269-processor-expert-snadne-nastaveni-mcu-periferii-jen-klikanim-mysi>.
- [43] HEROUT, P. *Učebnice jazyka C*. 4. přepracované vydání. České Budějovice: Kopp, 2005, 271 s. ISBN 80-7232-220-6.
- [44] GANSSLE, J. *A Guide to Debouncing* [online]. 3. revize. 2008 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.eng.utah.edu/~cs5780/debouncing.pdf>

12 Seznam příloh

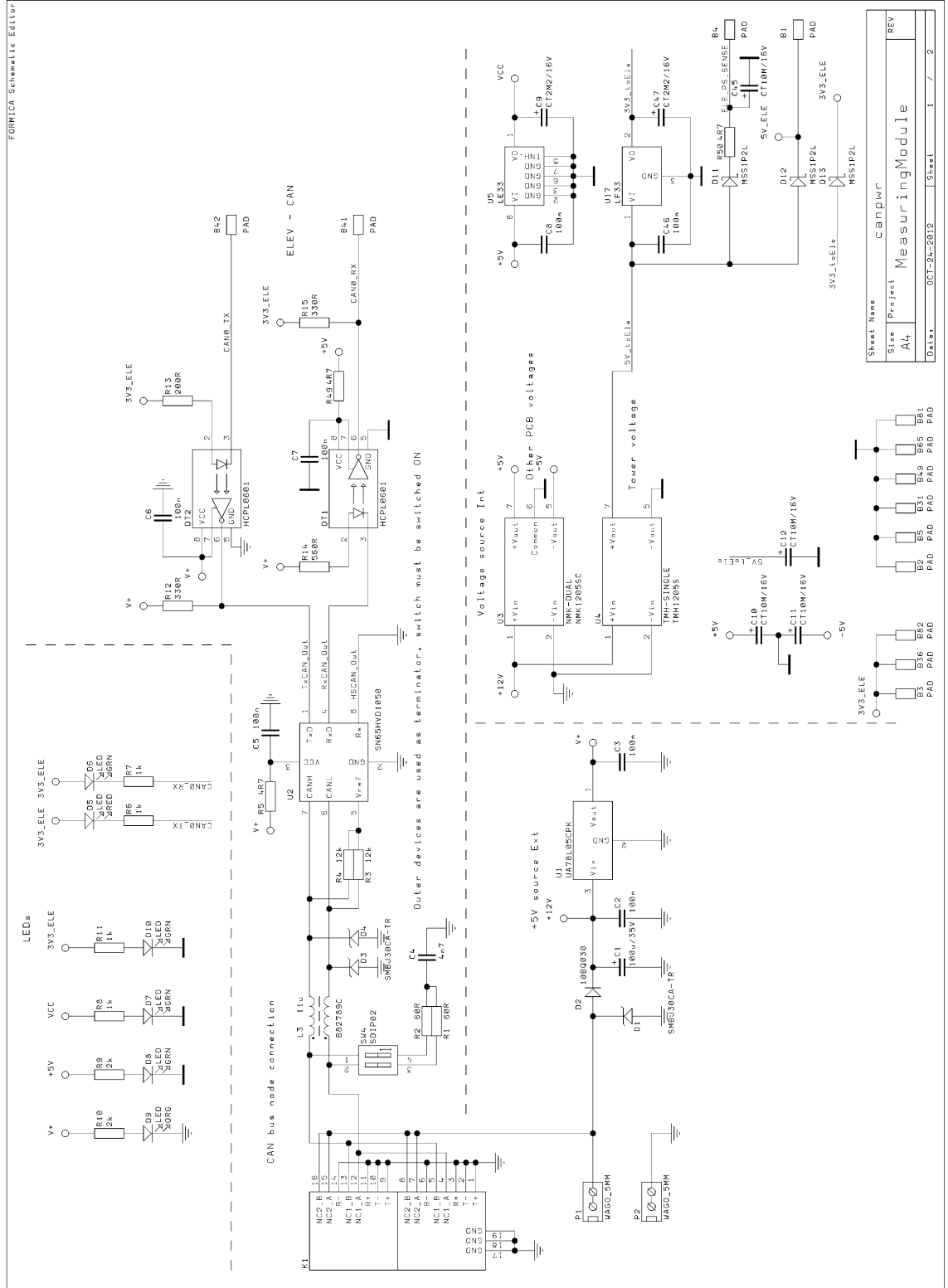
PŘÍLOHA Č. I	Seznam součástek
PŘÍLOHA Č. II	Celkové schéma zapojení, napájecí a komunikační část
PŘÍLOHA Č. III	Celkové schéma zapojení, měřicí část
PŘÍLOHA Č. IV	Nákresy desky plošných spojů, vrstvy mědi a masky (strana spojů)
PŘÍLOHA Č. V	Osazovací plán modulu
PŘÍLOHA Č. VI	Fotografie desky plošných spojů a celého modulu
PŘÍLOHA Č. VII	Mechanický výkres desky modulu
PŘÍLOHA Č. VIII	Testovací program
PŘÍLOHA Č. IX	Fotografie rozváděče Měřicí a Testovací stanice
PŘÍLOHA Č. X	Tabulka vypočtených a změřených hodnot testování napěťového kanálu
PŘÍLOHA Č. XI	Tabulka vypočtených a změřených hodnot testování proudového kanálu

PŘÍLOHA Č. I

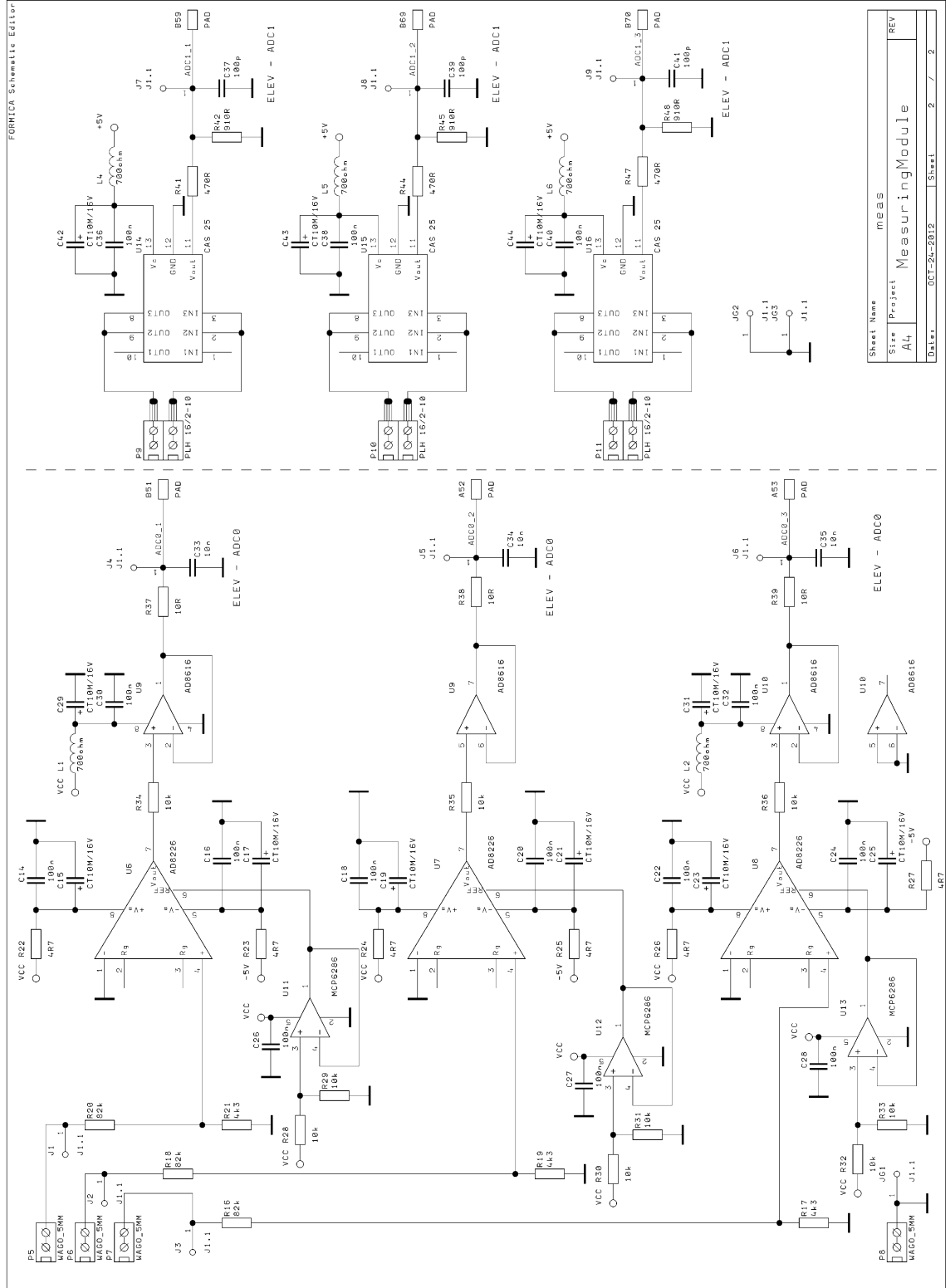
Reference	ks	Název	Hodnota	Pouzdro
C1	1	C tantal	100M/35V	CTD
C2, C3, C5, C6, C7, C8, C14, C16, C18, C20, C22, C24, C26, C27, C28, C30, C32, C36, C38, C40, C46	21	C	100n	C0805
C4	1	C	4n7	C0805
C9, C47	2	C tantal	2M2/16V	CTA
C10, C11, C12, C15, C17, C19, C21, C23, C25, C29, C31, C42, C43, C44, C45	15	C tantal	10M/16V	CTA
C33, C34, C35	3	C	10n	C0805
C37, C39, C41	3	C	100p	C0805
D1, D3, D4	3	SMBJ30CA		SMB
D2	1	10BQ030		SMB
D5	1	LED	červená	R1206
D6, D7, D8, D10	4	LED	zelená	R1206
D9	1	LED	oranžová	R1206
D11, D12, D13	3	MSS1P2L		SMP
DT1, DT2	2	HCPL0601		SOP8
K1	1	RJ45TRANS		RJ45X2SH
L1, L2, L4, L5, L6	5	L	700ohm	R1206
L3	1	CMCHOKE	11u	EIA1812
P1, P2, P5, P6, P7, P8	6	WAGO_5MM		W256746
P9, P10, P11	3	PLH 16/2-10		PLH 16/2
R1, R2	2	R	60R	R0805
R3, R4	2	R	12k	R0805
R5, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R49, R50	9	R	4R7	R0805
R6, R7, R8, R11	4	R	1k	R0805
R9, R10	2	R	2k	R0805
R12, R15	2	R	330R	R0805
R13	1	R	200R	R0805
R14	1	R	560R	R0805
R16, R18, R20	3	R	82k	R0805
R17, R19, R21	3	R	4k3	R0805
R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, R36	9	R	10k	R0805
R37, R38, R39	3	R	10R	R0805
R41, R44, R47	3	R	470R	R0805

Reference	ks	Název	Hodnota	Pouzdro
R42, R45, R48	3	R	910R	R0805
SW4	1	SDIP02		DIL2_SMD
U1	1	UA78L05CPK		SOT89
U2	1	SN65HVD1050		SOP8
U3	1	NMK-DUAL	NMK1205 SC	NMK-5PIN
U4	1	TMH-SINGLE	TMH1205 S	TMH-4PIN
U5	1	LE33		SOP8
U6,U7,U8	3	AD8226		SOP8
U9,U10	2	AD8616		SOP8
U11,U12,U13	3	MCP6286		SOT23-5
U14,U15,U16	3	CAS 25		CAS25
U17	1	LF33		D3PAK

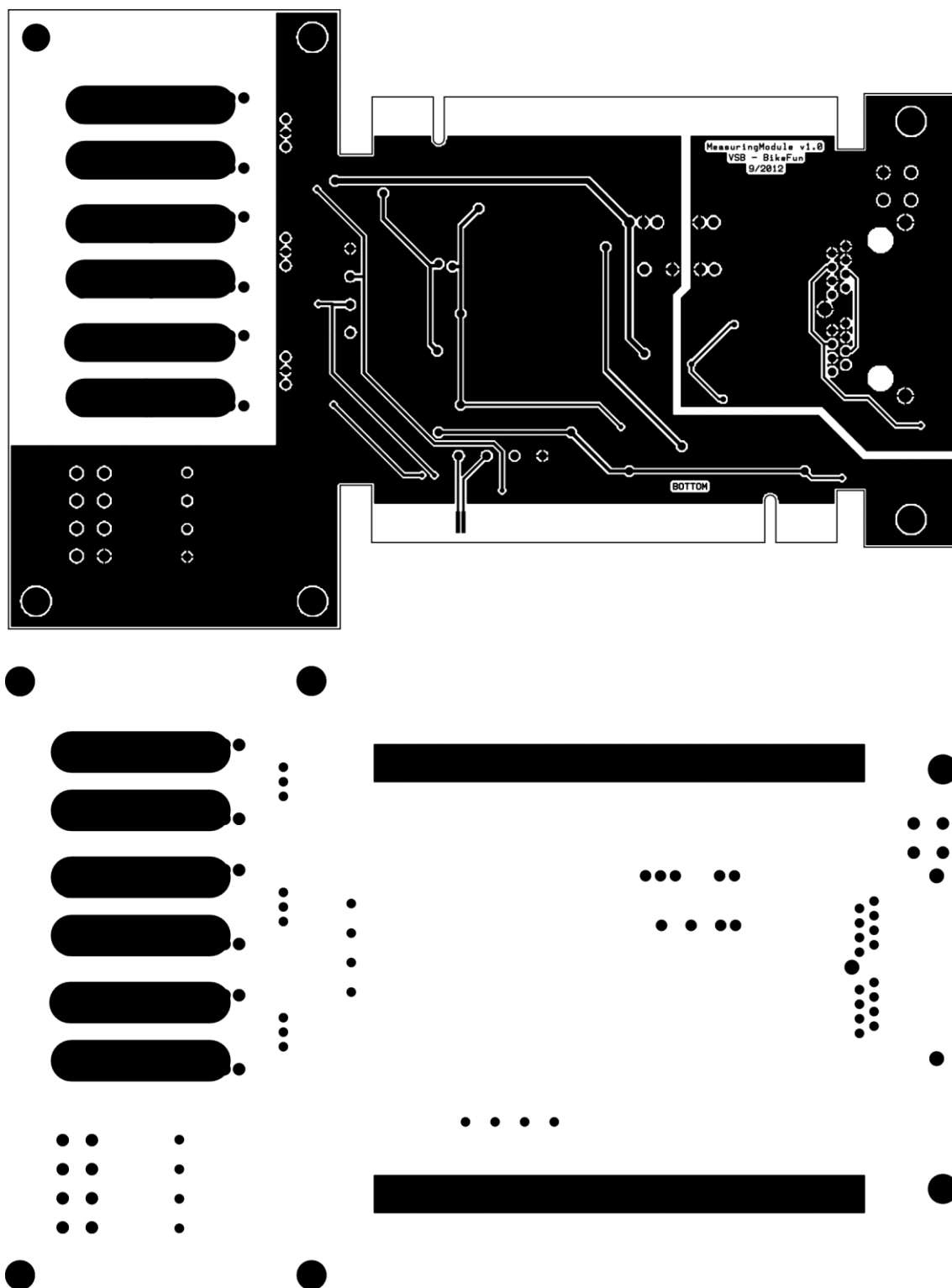
PŘÍLOHA Č. II



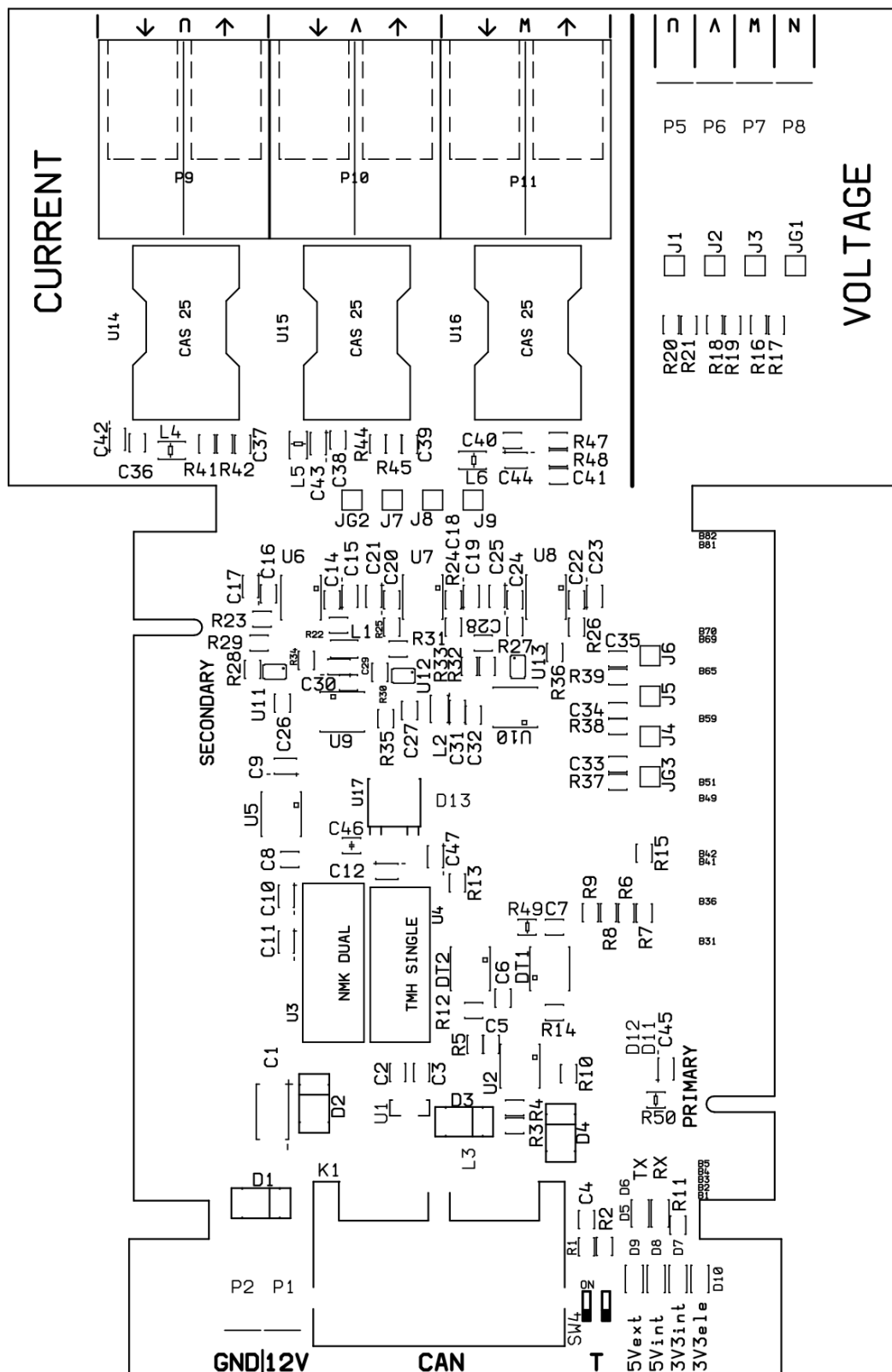
PŘÍLOHA Č. III



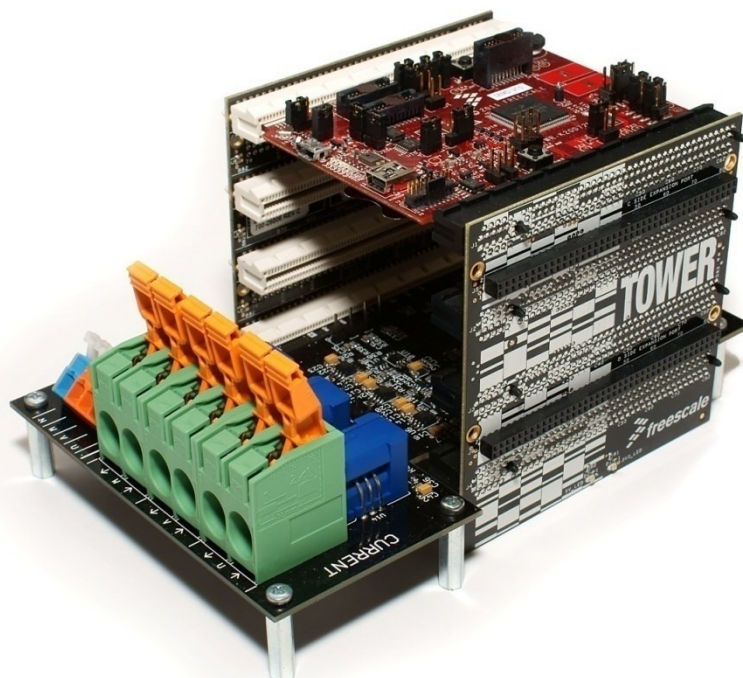
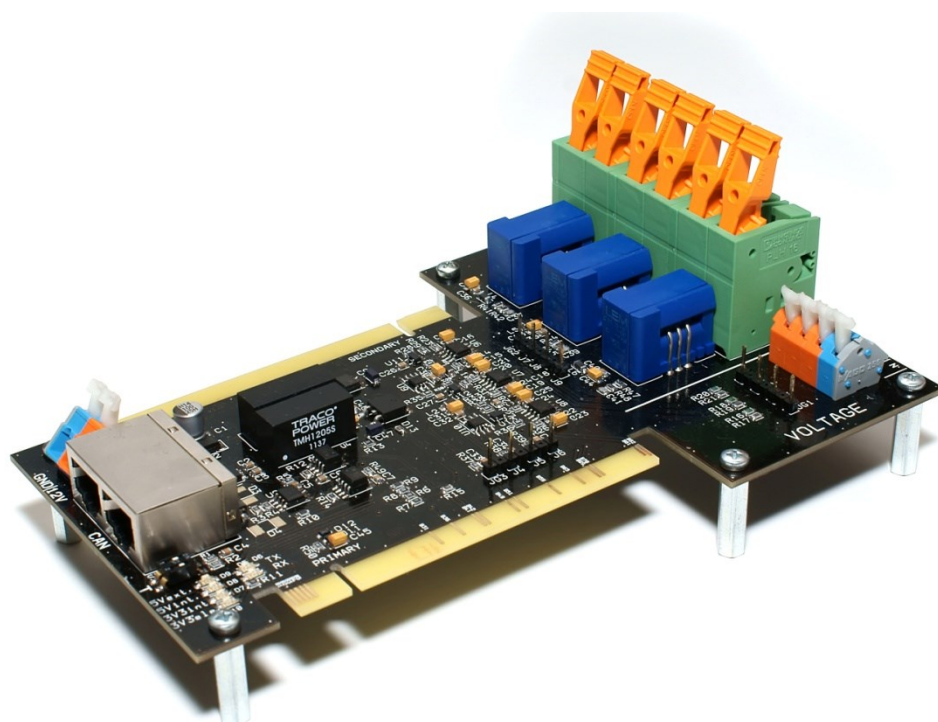
PŘÍLOHA Č. IV



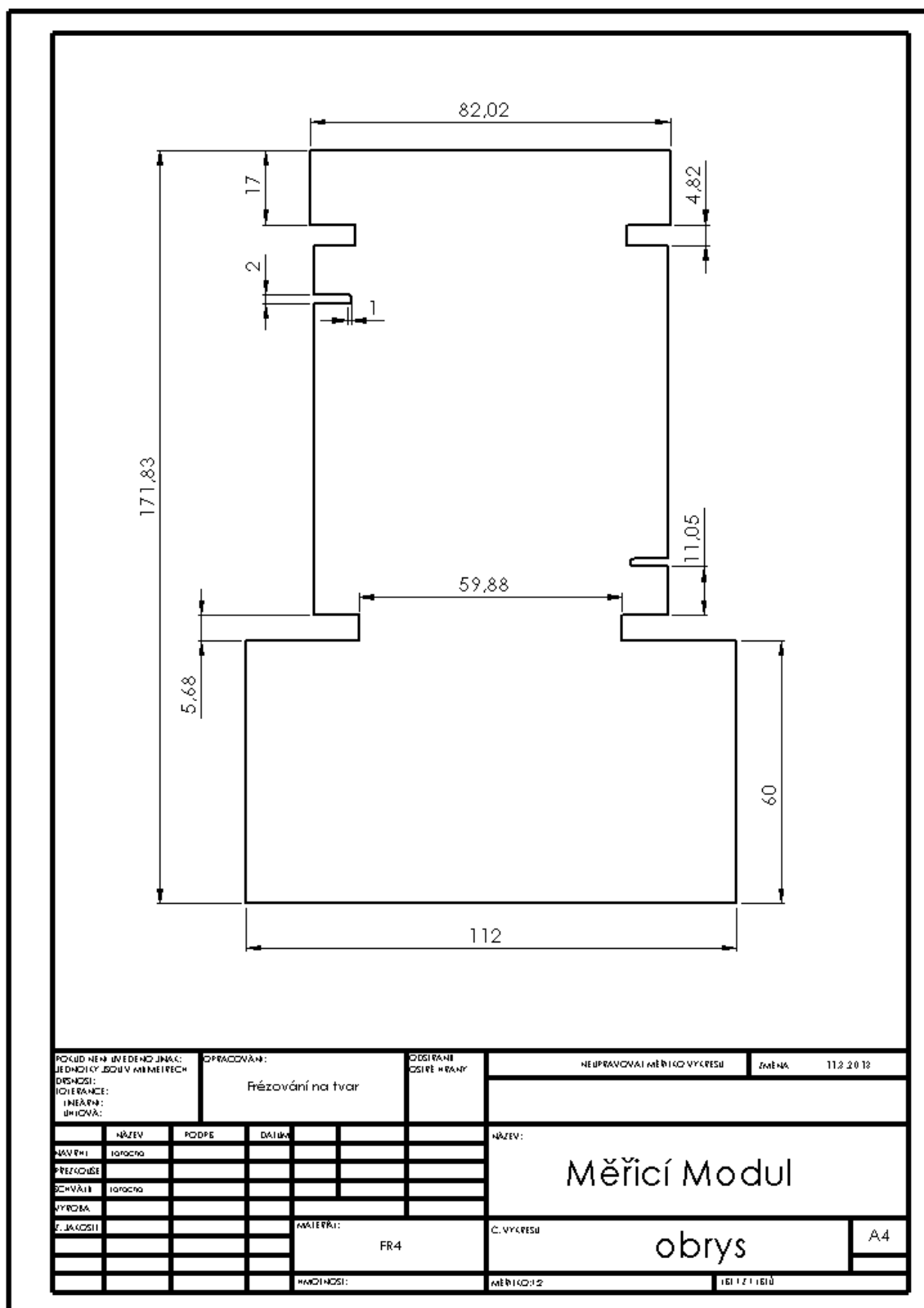
PŘÍLOHA Č. V



PŘÍLOHA Č. VI



PŘÍLOHA Č. VII



PŘÍLOHA Č. VIII

Form1

Port

COM4

Close

Device - Ini

SN: 313

SN: 4096

Module A

Module B

f: 10

Hz

Break - Ini

SN: 4096

Year: 2012

FW: 1.2.1702

Test Device

Stop

Stop Motor

Test Break

Počítadlo zprav 22953

General - values

Pedal dem: 0.0

dt/min

Pedal act: 0.0

dt/min

Vbat: 0.00

V

Vmot: 0.00

V

Support: 0

%

Support 8km/h

Received Support 8km/h

Set break

Slope

Power

0

%

0

%

Break - values

RPM: 0

dt/min

Pact: 0

W

Speed: 0

km/h

Temp: 0

°C

Dist: 0

km

Overheat

Low-Voltage

Connected

Fan

Slope

Module A

U11: 0.02

V

I11: 0.00

A

P11: 0.0

W

U12: 26.72

V

I12: -0.03

A

P12: -0.8

W

U13: 0.02

V

I13: -0.03

A

P13: -0.1

W

P1: 0.0

W

Trigger: DC

Dc

Module B

U21: -0.08

V

I21: 0.03

A

P21: -0.1

W

U22: -0.06

V

I22: 0.15

A

P22: -0.1

W

U23: -0.01

V

I23: 0.16

A

P23: -0.1

W

P2: 0.0

W

Trigger: DC

Dc

DIO

D17

D16

D15

D14

D13

D12

D11

D10

D07

D06

D05

D04

D03

D02

D01

D00

Calibration

Module A

Module B

U1

I1

U2

I2

U3

I3

Start

Stop

State>

IX

PŘÍLOHA Č. IX



PŘÍLOHA Č. X

Měření přenosové charakteristiky napětového kanálu U		
$U_{\text{vstupní}} [\text{V}]$	$U_{\text{výstupní}} \text{ spočtené } [\text{mV}]$	$U_{\text{výstupní}} \text{ měřené } [\text{mV}]$
-30	16,28	15,48
-28	125,19	125,21
-26	234,11	234,97
-24	343,02	344,61
-22	451,94	454,31
-20	560,85	563,92
-18	669,77	673,60
-16	778,68	783,24
-14	887,60	892,75
-12	996,51	1002,34
-10	1105,43	1111,87
-8	1214,34	1221,40
-6	1323,26	1331,00
-4	1432,17	1440,50
-2	1541,09	1550,00
0	1650,00	1659,60
2	1758,91	1769,10
4	1867,83	1878,60
6	1976,74	1988,20
8	2085,66	2097,70
10	2194,57	2207,30
12	2303,49	2316,80
14	2412,40	2426,30
16	2521,32	2535,80
18	2630,23	2645,50
20	2739,15	2755,20
22	2848,06	2864,80
24	2956,98	2974,50
26	3065,89	3084,10
28	3174,81	3193,80
30	3283,72	3299,50

PŘÍLOHA Č. XI

Měření přenosové charakteristiky proudového kanálu U		
$I_{\text{vstupní}}$ [V]	$U_{\text{výstupní}}$ spočtené [mV]	$U_{\text{výstupní}}$ měřené [mV]
-30	1154,60	1154,70
-25	1237,50	1237,50
-20	1320,40	1320,20
-15	1403,30	1403,10
-10	1486,20	1486,00
-5	1569,10	1568,90
-2,5	1610,55	1610,10
0	1652,00	1652,40
2,5	1693,45	1694,50
5	1734,90	1735,70
10	1817,80	1818,70
15	1900,70	1901,60
20	1983,60	1984,50
25	2066,50	2067,10
30	2149,40	2150,00